MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie de la Matière

Filière Génie Civil

Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du diplôme de Master En Génie Civil

Option : Structures

THEME

Effet de la nature et du type de sable sur l'ouvrabilité et les résistances d'un mortier autoplacant

Dirigé par :

Dr. O.BOUKENDAKDJI

Etudié par :

M. Dhiya Eddine CHADLI

M^elle^. Zahira RAHAL

Promotion : 2013-2014

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu DIEU

Miséricordieux qui m'a donné la force et la patience à achever ce mémoire.

Nous remercie* Mademoiselle *BOUKHALKHAL DJAMILA et mademoiselle Setari Chafik

Qu'elle m'aidé à finir ce travail

J'adresse mes plus sincères remerciements et toute ma gratitude, à :

Monsieur BOUKENDAKJI OTHMANE notre promoteur.

Tous les enseignants de l'institut de génie civil de l'université de MEDEA.

Tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner mon travail.

Toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Tables des Matières

Résumés
Table des Matières
Liste des Tableaux
Liste des figures
Natation et Abréviation
Introduction Générale.....27

PREMIÈRE PARTIE : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : BETON AUTOPLAÇANT

I.1.INTRODUCTION.....31
I.2 Historique..... 31
I.3 Définition d'un béton autoplaçant…….....32
I.3.1 Avantages techniques…….....32
I.3.2 Avantages socio-économiques…….....33
I.4 Les composants d'un BAP …….....33
I.4.1 Les granulats …….....34
I.4.2 Le ciment…….....36
I.4.3 Les ajouts minéraux.....36
I.4.3.1 La fumé de silice…….....36
I.4.3.2 Cendres volantes…….....37
I.4.3.3 Laitier des hauts fourneaux…….....37
I.4.4 Les Super plastifiants…….....37
I.4.5 L'eau de gâchage…….....40
I.4.6 Les agents de viscosité…….....40

I.2 Propriétés d'un BAP..... 41

I.2.1 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état frais.....41

I.2.1.1 Capacité au remplissage ……..…..... 42

I.2.1.2 Capacité de passage ……...…….....42

I.2.1.3 Résistance à la ségrégation …….....43

I.2.1.4 Facteurs clés des propriétés des BAP à l'état frais ……..……..... ..43

I.2.2 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci.....47

I.2.2.1 Résistances mécaniques ……...……..... 47

I.2.2.1.1 Résistance à la compression ……...…….....49

I.2.2.1.2 Résistance à la traction …….....49

I.2.2.2 Module de Déformation Longitudinal ……..…….....49

I.2.2.3 Retraits …….....50

I.2.2.4 Fluage …….. 53

I.2.2.5 Adhérence avec le ferraillage …….....54

I.2.2.6 Résistance au feu ….....55

I.2.2.7 Corrosion des armatures …….....55

I.3 Caractérisation des bétons autoplaçants.....56

I.3.1 Essai sur mortier frais …….....57

I.3.2 Essai sur béton frais …….....57

I.3.2.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams …….....57

I.3.2.2 Essai d'Etalement au Mini Cone.....58

I.3.2.3 Essai d'entonnoir (V-funnel) …….....32

I.3.2. 4 Essai de J-Ring…….....….59

I.3.2.5 Essai de la boîte en L (L-Box) …….....……60

I.3.2.6 Essai de la boîte en U …….....62

I.4 Formulations et Compositions des BAP 63

I.4.1 Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon) 65

I.4.2 Formulations modifiées dela méthode générale …….....….65

I.4.2.1 Kochi University of Technology (Japon) ……..…….....…65

I.4.2.2 University of Tokyo (Japon) ...…….....…65

I.4.2.3 Delft University (Denmark) …….....….....65

I.4.2.4 Méthode de Domone (U.C.L. Grande Bretagne) …….....….....66

I.4.3 Autres formulations.....66

I.5 Conclusion.....66

Chapitre II : Caractéristiques du sable

II.1.INTRODUCTION.....69

II.1.1. Définition 69

II.1.2. Origine et formation géologique.....70

II.2 CLASSIFICATION DES SABLES.

II.2.1.Selon l'origine.....70

II.2.1.1 Les sables détritiques.....70

II.2.1.2. Les sables éoliens.....70

II.2.2. Selon la nature.....70

II.2.3. Selon la grosseur des grains.....71

II.2.4. Selon la masse volumique.....71

II.3. PROPRIETES DES SABLES.....71

II.3.1. Composition minéralogique.....71

II.3.2Composition chimique.....71

II.4. PROPRIETES PHYSIQUES.....72

II.4.1. la forme des grains d'un sable..... .73

II.4.2.Porosité.....73

II.4.3. Granulométrie d'un sable..... 74

II.4.4. Module de finesse.....75

II.4.5. Propreté d'un sable..... 76

II.4.5.1.Equivalent de sable.....76

II.5.Propriétés mécaniques.....77

II.5.1. Liaison des sables.....77

II.5.2. Résistance des sables..... ...78

II.5.3. La dureté des sables.....78

II.6. PROPRIETES CHIMIQUES.....79

II.6.1. Réaction alcalis silice.....80

II.6.2. Réaction alcali carbonate.....80

II.6.3. Contamination par le sel..... 81

II.7. PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES 81

II.7.1. L'humidité des sables.....82

II.7.2. L'absorption d'eau 82

II.7.3. La perméabilité 83

II.7.4. Le foisonnement des sables 83

II.8. PROPRIETES THERMIQUES 84

II.9.CARACTERISATIONS DES SABLES.....85

II.9.1.CARACTERISTIQUES MECANIQUES.....85

II.9.2.CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....85

II.9.4.CARACTERISTIQUES CHIMIQUES .....87.

II.10. LES DIFFERENTS TYPES DE SABLE.....88

II.10.1.SABLE NORMALISE.....88

II.10.2.Sable de dunes 89

II.10.3. Sable de mer 90

II.10.4.Sable d'oued 91

II10.5. SABLE DE CONCASSAGE.....93

II.10.6.Correction des sables 93

CONCLUSION.....96

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
Chapitre III : Caractérisation des matériaux méthodes D'essais

III.1. Introduction……..99

III.2. Matériaux utilisées ……..99

III.2.1 le ciment ……99

III.2.2.Les Sables…….100

III.2.2.1. Le sable normalisé …….....101

III.2.2.2. Le sable Roulé ……101

III.2.2.3. Le sable de concassage ……102

III.2.2.4 .sable de dune ……102

III.2.3. L'EAU DE GACHAGE…….....103

III.2.4. Adjuvant ……103

III.5. Formulation des mortiers autoplaçants……...104

III.6. Malaxage du mortier ……..105

III.7. Méthodes d'essais ……..106

III.7.1. Les Essais……106

III.7.1.1. Essais sur les sables……...106

a-Masse volumique absolue …….....106

b- Equivalent de sable……..107

c- Taux d'absorption des granulats…….....108

d-Granulométrie……..108

III.7.1.2 Essais effectues sur mortier ……..109

III.7.1.2.1. A l'etat frais……...109

A. Essais d'étalement au mini-cône ……...109

A.1. Matériel nécessaire …….110

A.2. Mode opératoire …….110

B. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)……..111

B.1 Matériel nécessaire……111

B.2 Mode opératoire……111

III.7.1.2.2. A L'ETAT DURCI……112

A. Essai de traction……..112

B.Essai de compression ……..114

III.8. CONCLUSION …….....116

Chapitre IV : Résultats Expérimentaux Et Discussions

IV1. Introduction…….118

IV.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX A L'ETAT FRAIS.....118

IV.2.1 Sable normalisé……118

IV.2.2. Sable concassé (Mont Gorno)……..121

IV.2.3. Sable de Sidi Bayazid……..124

IV.2.4. Sable de Boughzoule…….....126

IV.2.5. Sable de Hassi Bahbah…….130

IV.2.6. Sable corrigé…….....132

IV.2.7. Comparaison des différents sables à l'état frais……135

IV.3. Résultats expérimentaux à l'état durci……...136

IV.3.1. Sable normalisé……...……140

IV.3.2. Sable concassé (Mont Gorno)……..121

IV.3.3. Sable de Sidi Bayazid……..143

IV.3.4. Sable de Boughzoule…….....146

IV.3.5 Sable corrigé…….....149

IV.4. CONCLUSION……..153

Conclusions générales et recommandations

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure I.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.....34

Figure I.2 : Critère de blocage et géométrie, Jin.....35

Figure I.3 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment 39

FigureI.4 : Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique.....39

Figure I.5 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant 48

Figure I.6 : Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire 51

Figure I.7 : Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires.....51

Figure I.8 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant.....53

Figure I.9 : Développement du Fluage du Béton.....54

Figure I.10 : Essai d'entonnoir pour les mortiers.....57

Figure 11 : Essai d'Etalement pour mortier.....58

Figure 1.12 : Essai à l'Entonnoir pour mortier.....59

Figure I.13 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de Différence d'Hauteurs….....60

Figure I.14 : La boite en L.....61

Figure I.15 : Essai à la boite en U.....62

Figure II.1 : Courbe granulométrique d'un sable 74

Figure II.2 : Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton. 76

Figure II.3. Foisonnement du sable en fonction de la teneur en eau.....84

Figure. II.4.Sable NORMALISE.....88

Figure II.5.Courbe granulométrique du sable normalisé selon la norme (CEN EN 196-1)…..89

Figure II.6. Sable des Dunes……90

Figure II.7 montre une vue sur le sable de mer…….91

Figure II.8.Sable d'Oued……..…91

Figure. II.9.Sable de concassage……...93

FigureII.10: Courbes granulométriques des sables (Sable Baghlia, Sable de Dune Bahbah et Sable Corrigé) ……..94

FigureII 12 localisation des sites……...95

Figure III.1. ciment portland compose " matine "……..…100

Figure III.2 les différents sable utilisés……..….100

Figure III.3. Sable normalisé……...101

Figure. III.4.Sable de Hassi Bahbah……...……101

Figure III.5. Sable de Sidi Bayazid…….…..102

Figure III.6 Sable de MONT GORNO……..…..102

Figure III.7 Sable de Boughezoul……..102

Figure III.8 le superplastifiant MEDAFLOW 145…….……...……..104

Figure III.9. Malaxeur à mortier……..…..105

Figure III.10.Séquence de malaxage du mortier……...……..106

Figure III.11. Les éprouvettes de mesure……...106

Figure III.12. Procédure de mesure de l'équivalent de sable……..……107

Figure III.13. Les différents repères de l'essai d'équivalent de sable…….……108

Figure III.14. Séries de tamis……..……109

Figure III.15 Granulométrie de déférant sable utilisé……...……..109

Figure III.16 : Essai d'étalement du mortier……...……110

Figure III.17. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) pour mortier……..…112

Figure III.18. Confection des éprouvettes ……..112

Figure III.19.Essai de traction par flexion.. …….……..…….……113

Figure III.20. Machine d'essai à la flexion par traction…….…….114

Figure III.21. Essai de compression……114

Figure III.22.diagramme des essais réalisés sur mortier……..……115

Figure III.23 : diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci……116

Figure IV.1. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé…….119

Figure IV.2. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé…….120

Figure IV.3. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base de sable Mont Gorno……..…122

Figure IV.4. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable Mont Gorno…….123

Figure IV.5. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid……125

Figure IV.6. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid……126

Figure IV.7. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Boughzoule……128

Figure IV.8. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Boughzoule…….129

Figure IV.9. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Hassi Bahbah……131

Figure IV.10. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable corrigé……..133

Figure IV.11. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable corrigé……134

Figure IV.12. Comparaison du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés……135

Figure IV.13 Comparaison du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés……136

Figure IV.14. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé……..…138

Figure IV.15. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé……...…139

Figure IV.16. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable concassé……...…141

Figure IV.17. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable concassé……142

Figure IV.18. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid……144

Figure IV.19. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid……..145

Figure IV.20. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du Boughzoule……...147

Figure IV.21. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Boughzoule……...148

Figure IV.22. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable corrigé……..150

Figure IV.23. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable corrigé……151

Figure IV.24. Comparaison du résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés……...152

Figure IV.25. Comparaison de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés……...…154

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage…….. 42

Tableau I.2 : Essais permettant la détermination de la capacité de passage…….43

Tableau II.1.Composition chimique des différents sables……72

Tableau II.2. Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable……...77

Tableau II.3. L'essai qui détermine la caractéristique mécanique…….……79

Tableau II.4. L'essai qui détermine la caractéristique mécanique…….……85

Tableau II.5. Les essais qui déterminent les caractéristiques physiques……85

Tableau II.6. Les essais qui déterminent les caractéristiques de fabrications……...…86

Tableau II.7. Les essais qui déterminent les caractéristiques chimiques…….87

Tableau II.8. Répartition des classes granulaires du sable normalisé ……88

Tableau III.1. L'Analyse chimique et composition du ciment El Mâtin……...…..99

Tableau III.2 : Essai physiques sur ciment…….……100

Tableau III.5Propriétés physiques d'identification des sables utilisés……...103

Tableau IV.1.Composition et Résultats des mortiers à base du sable normalisé……..……...118

Tableau IV.2. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable Mont Gorno…….…121

Tableau IV.3. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid……124

Tableau IV.4. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Boughzoule…….127

Tableau IV.5. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Hassi Bahbah……..……130

Tableau IV.6. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable corrigé……..……132

Tableau IV.7. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable normalisé……..…137

Tableau IV.8. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable concassé…….....140

Tableau IV.9. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid……..143

Tableau IV.10. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable de Boughzoule…….146

Tableau IV.11. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable corrigé……..…149

Tableau IV.12. Le dosage optimum de superplastifiant de différent sable correspond à son module de finesse……152

Notations et Symboles

σ_c : La contrainte de compression

σ_t : La contrainte de flexion

V : L'unité de volume

v : Le volume des vides contenus dans l'unité de volume $''V$

A : La masse du pycnomètre avec l'échantillon

Ab : Le coefficient d'absorption d'eau des granulats

Al_2O_3 : L'alumine

BAP: Bétons Autoplaçants

BHP: Bétons à hautes performances

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

BAN :Le béton autonivelant

BO : Le béton ordinaire

PMS : Le polymère de mélamine sulfonate

PNS : Le polymère de naphtalène sulfonate

LS : Les lignosulfonates modifiés

PC : poly carboxylate

BHP : Le béton à haute performance

K_{sf} = taux de fines particules dans le sable

C : Dosage en ciment

C : La masse de l'échantillon humide

c : Compacité

C_3A : Aluminates tricalciques

C_3S : Silicates tricalciques (alite)

$CaCO_3$: Teneur en calcaire

$CaCO_3$: Teneur en calcaire

Cao : La chaux

Cc : Le coefficient de courbure

CPJ-CEM II/A 42.5 : Le ciment portland composé classe II /A avec résistance 42.5

Cu : Le coefficient d'uniformité

d/D : Classe granulaire

E : Dosage en eau

E/C : Le rapport eau/ciment

ES : L'équivalent de sable

ESP : L'équivalent de sable à piston

ESV : L'équivalent de sable à vue

F_C : La charge de rupture

Fe_2O_3 : L'oxyde de fer

H : Heure

H'_2, H_2 : Hauteur du sable propre seulement

H_1 : Hauteur du sable propre avec des éléments fins

I : Moment d'inertie de la section transversale

I: Indice des vides

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

M_1: Poids de l'échantillon déshydraté

M_2: Poids de l'échantillon après saturation

Ma : La masse de l'échantillon

MBG: Mortier à base de sable Boughezoul

MBH : Mortier à base de sable Hassi Bahbah

MBZ : Mortier à base de sable Sidi Bayazid

MCR : Mortier à base de sable Corrigé

$M_{f\,1}$: Le module de finesse du sable gros

$M_{f\,2}$: Le module de finesse du sable fin

M_f : Le module de finesse du sable

Mf : Le module de finesse

MgO : Oxyde de magnésium

MgO : Oxyde de magnésium

Min : Minute

MMG: Mortier à base de sable Mont Gourno

MNR : Mortier à base de sable normalisé

Ms : La masse de l'échantillon sec

NA : Norme Algérienne

NB : Norme Belgique

NE : Norme Européenne

OH^- : Ions

P : La porosité

PH : Potentiel hydrogène

Rc : Résistance à la compression

Rt : Résistance à la traction

S : La densité apparente du granulat sur une base saturée et superficiellement sèche

S : Le sable

S/M : Le rapport sable/mortier

S_1/S : Proportion du sable fin

S_2/S : Proportion du gros sable

SiO_2 : La silice

Si-OH : Silanols

SO3 : Sulfates

S_P/C : Le rapport superplastifiant/ciment

T : Le temps d’écoulement

ν : La distance de la fibre inférieure la plus éloignée

ρ_{abs}: Masse volumique absolue

ρ_{app}: Masse volumique apparent

Résumé.

Les Bétons Autoplaçants (BAP) sont des matériaux très fluides qui se mettent en place sans vibration. Afin de garantir une très bonne fluidité avec une homogénéité satisfaisante, ces bétons consomment beaucoup plus de ciment et de superplastifiant.

Le sable est l'une des plus importantes ressources naturelles disponibles en différents types destinés à la construction et l'urbanisation. Pour sélectionner les meilleurs et les plus appropriées parmi ces différentes espèces, des études doivent être réalisés pour déterminer les caractéristiques de chaque type de sable afin de choisir le meilleur.

Le but de ce mémoire est d'étudier l'effet de la nature et du type de sable utilisés dans un mélange de mortier autoplaçant sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques de ce dernier. Pour cela nous ferons varier les pourcentages de superplastifiant et le type de sable dans le mélange de Mortier Autoplaçants MAP.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي مادة عالية السيولة و هي قادرة على التموضع دون الحاجة إلى جهد ميكانيكي .تستهلك الخرسانة المرصوصة ذاتيا الكثير من الأسمنت و المواد الكيميائية) الملدناتالممتازة (و سبب ذالك هو ضمان تدفق جيد مع تجانس مرض .

الرمل هو احد أهم الموارد الطبيعية المتوفرة بأنواع عديدة و مختلفة و الموجهة للبناء والعمران ولاختيار الأفضل و الأنسب من بين مختلف هذه الأنواع تقام دراسات لخصائص كل رمل على حدى لاستخلاص الأجود في النهاية.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير طبيعة ونوع الرمال المستخدمة في مزيج ملاط مرصوص ذاتيا,من اجل هذا نقوم بتغيير نسب المواد الكيميائية (الملدنات الممتازة) ونوع الرمال لمعرفة قوة ملاط من حيث مقاومة الانضغاط و الشد وبخصوصيات ريولوجية و ميكانيكية جيدة لهذه الأخيرة.

ABSTRACT

The self-compacting concrete (SCC) are very fluid materials into place without vibration. To ensure a good flow with satisfactory uniformity, these concretes consume more cement and superplasticizer.

Sand is one of the most important natural resources available in different types for the construction and urbanization, to select the best and most appropriate among these species, studies should be conducted to determine the characteristics of each type of sand to choose the best.

The purpose of this paper is to study the effect of the nature and type of sand used in the mortar mix on SCC workability and mechanical resistance of the latter. For this we will vary the percentage of superplasticizer and the type of sand in the mixture to compacting mortar MAP.

Le béton est le matériau structural le plus utilisé pour la construction des infrastructures sociales et industrielles. Toutefois, pour construire des structures durables et fiables, il est nécessaire, non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages très difficiles avec des défaillances structurales très probables. Les bétons autoplaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. Cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et garantie des structures et durables. Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, au travers de zones confinées seulement sous l'effet de la gravité, tout en développent une bonne compacité sans exiger une main-d'œuvre spécialisée durant la consolidation. Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable 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.

Les bétons autoplaçants se caractérisent, en général, par une formulation contenant divers adjuvants chimiques et ajouts minéraux en proportions bien précises pour satisfaire les exigences du cahier de charge en matière de maniabilité et de stabilité. L'incorporation des ajouts cimentaires permet d'améliorer les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des BAP. Les fillers calcaires sont généralement utilisés pour augmenter la quantité de poudre dans la composition des BAP. Ces fillers ont différents effets chimiques et physiques contribuant à l'amélioration des propriétés des matériaux cimentaires. Parmi les effets physiques est l'augmentation de la densité et diminution de volume de poudre élevé pour atteindre une ouvrabilité souhaitable du béton. En outre l'utilisation des fillers calcaires permet de réduire le coût des BAP, et constitue une solution technologique et environnementale face aux problèmes liés au dépôt de ces fillers.

Dans la production des sables calcaires concassés, il existe une proportion importante des fines dans ces sables, cette proportion des fines est de l'ordre de 10 – 15% de la masse totale du sable concassé. L'utilisation des sables riches en fines peut considérer comme une source alternative des fillers. Ces sables améliorent le coût des BAP par réduction de la demande élevée en fillers d'une part, et d'autre part l'obtention des BAP avec des bonnes propriétés physiques et mécaniques des BAP tels que la perméabilité, l'absorption et la résistance à la compression.

Par ailleurs, l'abondance du sable de dunes, particulièrement dans les déserts du Sahara qui occupe une grande partie du territoire Algérien, et l'idée de promouvoir sa valorisation dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique. Avec l'épuisement progressif des ressources en granulats en Algérie et le coût élevé de leur transportation, il devient évident comme intérêt tant économique qu'environnementale qui pourrait présenter la valorisation des sables locaux abondants tel que le sable de concassage et le sable de dunes pour la fabrication des bétons. C'est dans ce contexte que le présent travail s'inscrit et il a pour objectif en premier lieu, d'utiliser différents types des sables pour la fabrication des BAP. A cet égard, nous avons utilisé trois types de sables de différentes origine et morphologie, il s'agit du : sable de concassage, sable dunaire et sable alluvionnaire. Nous avons aussi utilisé ces sables dans des mélanges binaires et ternaires.

Le but de ce travail est d'étudier effet de la nature et du type de sable sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques d'un mortier autoplaçant. Pour cela le travail a été réparti en quatre chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique du béton autoplaçant, notamment les différents aspects de caractérisation de ses propriétés intrinsèques tels que, la formulation, les propriétés mécaniques et la durabilité.

Le deuxième chapitre présente les sables ainsi que leur nature et leurs caractéristiques avec leurs déférents types.

Le troisième chapitre a été consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés et les formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental dans le cadre de cette étude. Ensuite, nous exposons aussi les différents essais caractérisant le mortier à l'état frais.

Le chapitre quatre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats des différents essais réalisés.

Enfin une conclusion générale ainsi que des recommandations sont données pour de futurs travaux.

INTRODUCTION GENERALE

PREMIÈRE PARTIE
ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

DEUXIÈME PARTIE
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE I

BETON AUTOPLAÇANT

CHAPITRE II

Caractéristiques du sable

CHAPITRE III

Caractérisation Des Matériaux et Méthodes D'essais

CHAPITRE IV

Résultats Expérimentaux Et Discussions

CONCLUSION GENERALE

ANNEXES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'historique du béton autoplaçant, les avantages de son utilisation, ses composants, ses propriétés, ses caractéristiques et sa formulation tout en regroupant en général les travaux de recherche antérieurs dans ce domaine.

I.1 HISTORIQUE

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [1][2]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). La nécessité de ce type de béton a été proposée par OKAMURA en 1986 [3] [4]. Des études pour développer le béton autoplaçant y compris une étude fondamentale sur l'ouvrabilité du béton ont été effectuées par OZAWA et ses collègues à l'université de Tokyo [5] [6].

L'idée d'un béton fluide ou béton autoplaçant (BAP) est apparue en 1989, alors que les Japonais avaient besoin d'un béton qui n'exige pas une main d'œuvre nombreuse et qualifiée, et qui fournisse une résistance à la compression élevée à jeune âge pour pouvoir augmenter la productivité. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les grattes ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides. [2,7]

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océanopolis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraillés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication. [8]

Dans des cas particuliers, le BAP peut être considéré comme un béton autonivelant (BAN). Cette dénomination n'est pas utilisée par tous les auteurs, puisque certains d'entre eux font la distinction entre le béton autoplaçant et le béton autonivelant, le premier terme étant employé lorsqu'il s'agit d'un coulage vertical et le second correspondant à une mise en œuvre horizontale. [9,10]

Le premier article sur le béton autoplaçant a été publié en 1989 par OZAWA [11] [12], et en 1992 OZAWA et d'autres collègues ont présenté un travail sur ce sujet à une conférence internationale de béton tenu à Istanbul [13]. 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. Grace aux 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. [3] [14].

I. 2. Définition d'un béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants (BAP) sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. [11]

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en oeuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine. La fluidité des bétons autoplaçants 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 maintien 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 [15].

En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire [3]:

I.2.1. Avantages techniques

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative.

On peut résumer ses avantages techniques dans les points suivants:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre 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.

I.2.2 Avantages socio-économiques

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site
- une diminution de la pénibilité des tâches
- une réduction des risques d'accident
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- 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.

I.3. Les composants d'un BAP

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral. [16,17] Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposés pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont : Les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité.

La figure 1.1 montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le BAP

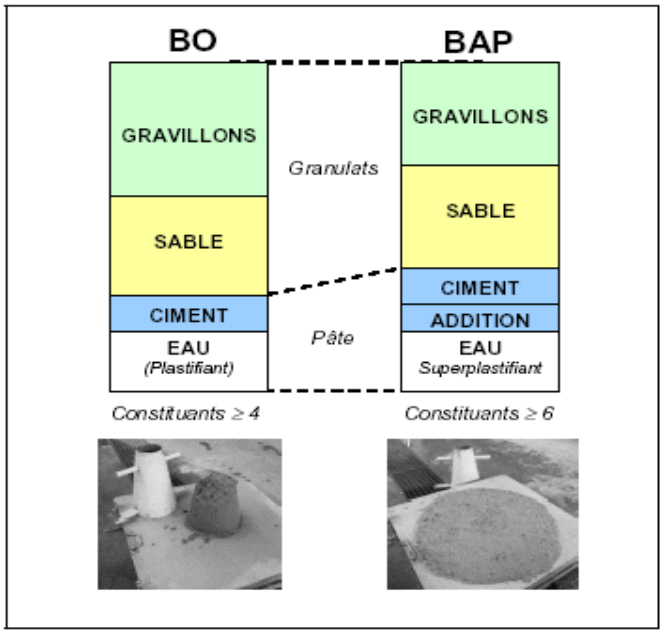


Figure I.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un

BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique

Et d'un BAP

I.4.1. Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

Les granulats roulés présentent par ailleurs un plus petit vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir.

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton. [19]

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible [20].

Par ailleurs la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique.

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 15 mm. Dans sa thèse Bethmont [21] explicite que la taille maximale D max des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Jin [22] reporte que Fujiwara et al, ont calculé, dans le cas d'un ferraillage unidirectionnel (ferraillage vertical uniquement) et dans le cas d'un ferraillage bidirectionnel (ferraillage verticale et horizontal), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue. Ils obtiennent les critères présentés sur la figure I.2 [22]:

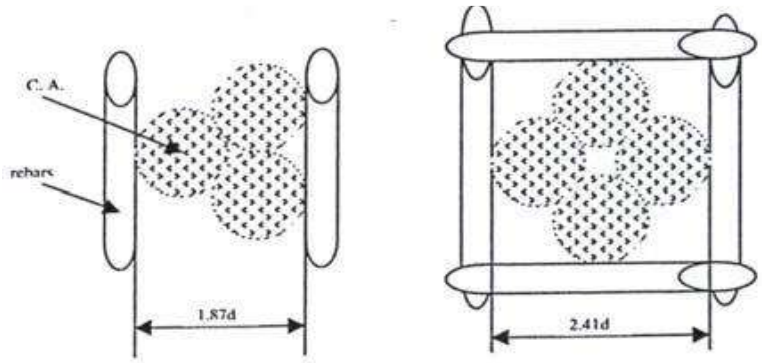


Figure I.2 : Critère de blocage et géométrie du calcul, Jin [33]

Cas 1: $e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) d$ *Avec d : diamètre maximal des granulats* (I.1)

Cas 2: $e_{\min} = \left(1 + \sqrt{2}\right) d$ *Avec d : diamètre maximal des granulats* (I.2)

I.3.2. Le ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, c'est à dire faire en sorte que le béton (ou la pâte de ciment) reste en phase dormante pendant une période suffisamment longue (de l'ordre d'une heure et demi) avant le passage à l'état solide. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation. Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, etc.).

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et á la durabilité du béton. Le rapport E/C est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons. Ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passaient par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton [19].

I.3.3. Les ajouts minéraux

I.3.3.1. La fumé de silice

Le fumé de silice est un sous-produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électrique dans lesquels sont élaborés du silicium et autres alliages. La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour sonner de l'oxyde de silicium SiO_2 en quantité prédominante (> 90%). La taille fines de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire en comblant les vides et en augmentant la compacité. En plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

I.3.3.2 Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultats de la combustion du charbon dans une centrale électrique. En 1937 R. E. Davis de l'université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie et depuis les études se sont multipliées et son utilisation s'est répandue à cause des améliorations apportées et l'économie enregistrée par son emploi.

I.3.3.3 Laitier des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit de l'usine sidérurgique formée essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous-produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistre la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis aux USA (1896).

I.3.4. Les Superplastifiants

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants, soit au plus 2% du poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air). La compétition entre l'effet de défloculation et le ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition inter faciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère. Avec un E/C de 0.55, le ressuage est dominant, ce qui occasionne une zone de transition inter faciale de moindre qualité dans la plupart des cas. Il s'agit par contre d'une situation extrême puisque l'utilisation des superplastifiants n'est généralement pas nécessaire à un tel rapport eau/ciment. Avec un E/C de 0,4, le compromis entre la défloculation et le ressuage se reflète bien, par l'excès de conductance inter faciale, l'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise également le ressuage. Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance inter faciale est semblable avec et sans superplastifiant [23]. D'après des résultats antérieurs sur le même projet, à un E/C de 0,35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition inter faciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années [23].

Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante :

- Le polymère de mélamine sulfonate (PMS)
- Le polymère de naphtalène sulfonate (PNS)
- Les lignosulfonates modifiés (LS)
- Les superplastifiants à base de polyacrylate, polycarboxylate (PC) ou de polyéthylène.

En effet, ils sont composés d'une chaîne chargée venant s'absorber à la surface des particules. Une surface sur laquelle sont greffées d'autres chaînes se déployant dans la solution. Uchikawa et al. [24] prouvent, pour la première fois, l'action des forces stériques responsables de la dispersion dans une pâte de ciment. Ces forces sont prépondérantes suivant la nature du polymère. Un polymère branché conduit à un effet stérique important du fait des longues chaînes, alors qu'un polynaphtalène est régi par l'effet électrostatique. Neubauer et al. [25] ont montré que l'effet stérique est très important dans la défloculation des pâtes de ciment. Néanmoins, suivant la nature du superplastifiant utilisé les deux effets sont combinés, avec parfois une prédominance de l'un des deux. Nous pouvons ainsi distinguer, de manière très simplifiée, les polyélectrolytes (ancienne génération) des polymères greffés [26] (nouvelle génération). El-Barrak dans sa thèse [20] souligne que l'effet des polyélectrolytes, comme leurs noms le laissent supposer, est basé sur les répulsions électrostatiques. Ils viennent s'absorber à la surface des particules de ciment créant ainsi une force répulsive par la présence de charges de même signe. Flatt et al. [26] étudient l'absorption de superplastifiants sur des poudres modèles, avec un PH et un potentiel zeta identiques à celui d'une pâte de ciment. Ils relient la répulsion électrostatique au potentiel zeta.

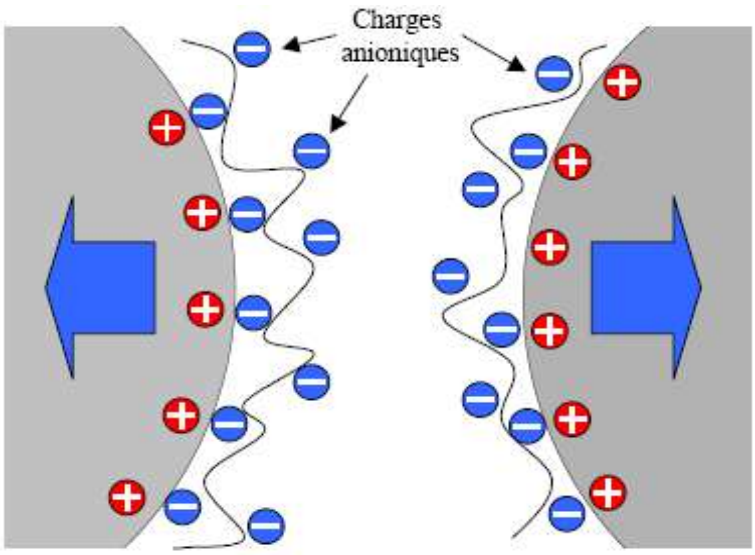


Figure I.3 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment [18]

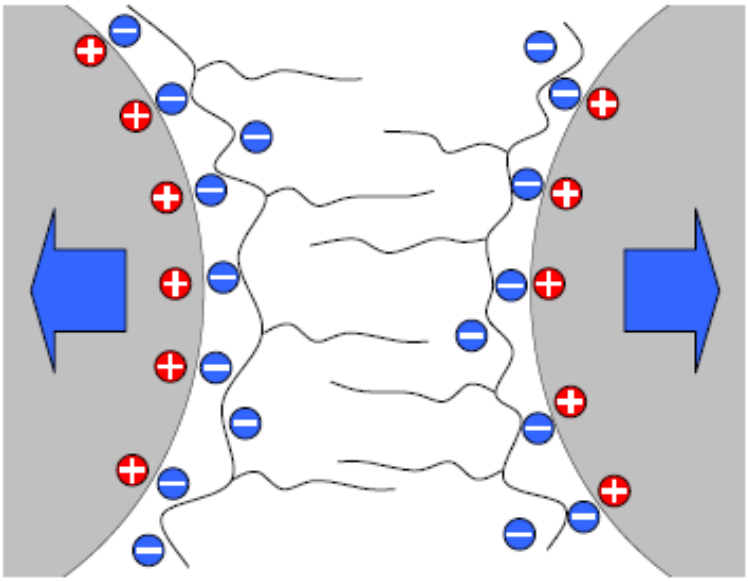


Figure I.4 : Particules de ciment recouvertes de polymères à fort Encombrement stérique [20]

Les phénomènes d'incompatibilité ciment- super plastifiant sont dus à une interaction entre le super plastifiant et le sulfate de calcium (gypse - CaSO4 - 2H2O) contenu dans le ciment, en empêchant ce dernier de débloquer l'hydratation du C3A en formant une coquille d'ettringite. Ce problème d'incompatibilité se présente surtout dans les bétons à faible E/C (BHP). Dans tel cas on remarque une perte de fluidité (affaissement) rapide.

Cependant, cette incompatibilité est très rarement remarquée dans les bétons avec un E/C > 0,5. En plus, Agrawal et al [27] ont trouvé que la compatibilité du super plastifiant avec le ciment dépend plus de la qualité du ciment ou du liant. Ainsi le ciment de classe 52,5 est plus compatible que les classes 32,5 et 42,5. En plus ils ont trouvé que le ciment au laitier était compatible avec tout le superplastifiant qu'ils ont utilisé. [28]

I.3.5 L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés [29] qui peuvent étériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, 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 la suspension entre les granulats. [28] 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. König et al [30] ont utilisé, avec succès, de l'eau recyclée pour la fabrication d'un béton auto plaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi.

I.3.6 Les agents de viscosité

Généralement les superplastifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle peut aller du simple épaississement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthine.
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose.
- Colloïde naturel.
- Suspension des particules siliceuses.

Le mode d'action des agents de viscosité se fait par adsorption des molécules d'eau sur les longues chaînes du polymère induisant un gonflement du polymère qui augmente la viscosité de l'eau et par conséquent celle de la pâte de ciment.

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles [31]. Khayat et al. [31] ont fixé 3 catégories générales pour les agents de viscosité :
Les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques. Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges [31].

Les agents de viscosité peuvent avoir une seconde fonction, le retard de prise, ainsi que l'entraînement d'une certaine quantité d'air, entraînant des conséquences sur la résistance mécanique du béton. Les effets secondaires sont fonction du type et du dosage de l'agent de viscosité utilisé.

I.2 Propriétés d'un BAP

I.2.1 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état frais

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage). Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'autocompaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides inters granulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l /m3.

- Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m3.
- Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et des modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier. [28]

Les guides Européens pour le BAP [27], répartissent les BAP à l'état frais en quatre (04) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais à réaliser pour chacune d'elles :

I.2.1.1 Capacité au remplissage

La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre [32], même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de deux dispositifs, le cône d'Abrams et l'Orimet (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage

Propriété	**Essais à réaliser**
Capacité au Remplissage	• Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow) • Temps à T_{50} au cône d'Abrams (T_{50} Slump-Flow) • Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) • Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Etalement au Tube Orimet (Orimet) • Essai du caisson (Fill Box)

I.2.1.2 Capacité de passage

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage. En définissant la capacité de passage, il est nécessaire de considérer, la géométrie et la densité du ferraillage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulat.

La dimension à définir est l'espacement entre les bars, cet espacement doit permettre l'écoulement normal du béton. L'espacement entre la barre de ferraillage et le coffrage n'est pas à considérer car le béton peut contourner la barre et n'aura pas besoin de s'étaler continuellement à travers cet espace. La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de Trois dispositifs, le cône d'Abrams en présence du J-Ring, la boîteen L (L-Box) et la boîte en U (U-Box) (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Essais permettant la détermination de la capacité de passage

Propriété	Essais à réaliser
Capacité au passage	• Etalement au cône d'Abrams en présence • Temps à T50au cône d'Abrams en présence du J-Ring • Différence d'Hauteurs au J-Ring • Essai de la Boite en L (L-Box test) – Mesure • de H2/H1 • Essai de la boite en U (U-Box test)

I.2.1.3 Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité sur site du béton autoplaçant. Le BAP peut souffrir de la ségrégation durant la mise en place et après mais avant son durcissement. La ségrégation qui se produit après la mise en place est la plus défavorable surtout pour les longs éléments et même pour les éléments minces comme les dalles, ce qui peut mener vers des dégradations de surface comme sa fissuration.

La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de classe élevée de fluidité ou de faible viscosité, ou bien dans le cas où les conditions de mise en place encouragent la ségrégation. Si aucun de ces cas ne se présente, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier la classe de la résistance à la ségrégation. L'essai de la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm.

I.2.1.4 Facteurs clés des propriétés des BAP à l'état frais

Le comportement et les propriétés d'un béton autoplaçant à l'état frais dépendent étroitement de ses caractéristiques rhéologiques. L'expérience de ces dernières années a permis de rassembler des informations suffisantes pour cerner les valeurs limites de certains paramètres déterminants pour l'obtention d'un BAP. A cet égard, il convient de ne pas oublier que l'ouvrabilité et les propriétés d'un béton à l'état frais sont calculées en fonction du temps et qu'elles évoluent rapidement. Ainsi, lors d'essais préliminaires pour la production du BAP en centrale de béton prêt à l'emploi on veillera à ce que les performances d'ouvrabilité requises soient assurées à l'arrivée du béton sur le chantier, pour cela les points suivants sont des facteurs clés pour avoir un bon BAP à l'état frais :

A. Type de ciment

L'influence du ciment sur l'ouvrabilité dépend de sa composition minéralogique, de sa finesse de mouture et des adjuvants avec lesquels il est utilisé simultanément. Le type de ciment affecte surtout la rhéologie initiale du mélange de béton. La composition du ciment, par exemple la teneur en C_3A qui réagit très rapidement, va déterminer la rhéologie du mélange [33]. Beaupré et Mindess [34] ont effectué des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment type 50 (classe 52,5 norme européenne) montre le plus faible seuil de cisaillement, un mélange fait avec du ciment type 30 (classe 32,5 norme européenne) avec fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 30 présente un seuil de cisaillement entre les deux précédents. La viscosité plastique demeure constante en général [34].

B. Dosage en eau

Le dosage en eau peut être utilisé comme grandeur de référence de la même manière que pour un béton conventionnel vibré. Si le béton autoplaçant est trop fluide (viscosité Trop faible, ouvrabilité trop élevée) et présente une forte tendance à la ségrégation, on pourra réduire la quantité d'eau dans la pâte de ciment. Si nécessaire, l'ouvrabilité du béton pourra être adaptée en augmentant le dosage en adjuvant fluidifiant.

Très récemment Hwang et Khayat [35] ont trouvé qu'une composition de BAP a une considérable influence sur l'apparition des fissures. Ainsi une composition à E/C = 0,42 prend 26 à 37% plus de temps avant l'apparition des fissures qu'une composition à E/C = 0,35 en utilisant le même superplastifiant. Par contre la première composition montre un plus grand retrait plastique que la deuxième, d'après les auteurs ceci est dû au fait que la composition à E/C = 0,42 a un plus grand volume de pâte et moins de gros granulats (en volume).

C. Excédent de pâte de ciment

Un excédent de pâte de ciment dépassant 90 l/m^3 peut s'avérer nécessaire en cas de faible valeur du rapport E/C ou d'une proportion élevée de granulats concassés. L'étanchéité et la résistance à la compression d'un tel béton s'en trouveront améliorées. Si le volume excédentaire de pâte de ciment est nettement inférieur à 90 l/m^3, on doit s'attendre à un étalement plus faible, ainsi qu'à une tendance accrue à l'apparition de blocages au droit des barres d'armatures, de nids de gravier et de bullage sur les parements.

D. Quantité de fines (<80μm)

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP doivent contenir une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) supérieure à celle des bétons ordinaires. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire.

L'ajout de fumée de silice augmente le seuil de cisaillement à partir d'une teneur de 7%. A un dosage inférieur à 7% en fumée de silice, un effet négligeable a été observé [34]. Aussi, si la teneur en ciment est faible, l'augmentation du seuil de cisaillement se fait moins sentir. Le comportement des bétons renforcés de fibres est Binghamien, lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente.

E. Choix et dosage des Adjuvants

Les superplastifiants sont généralement utilisés pour des bétons à faible rapport E/C. Généralement, on observe une diminution du seuil de cisaillement avec 1'augmentation de la concentration en superplastifiant alors que la viscosité plastique ne change pratiquement pas [36]. Un autre effet des superplastifiants est la perte rapide de l'affaissement dans le temps. Un béton non superplastifié sera relativement stable dans le temps quant à ses propriétés rhéologiques alors qu'un béton superplastifié peut montrer une prise beaucoup plus rapide ou une prise anormalement retardée à de très hautes concentrations en superplastifiant [37].

L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires. Sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages élevés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé avec perte des performances recherchées du BAP [38].

G. Agents entraîneurs d'air

La teneur en air affecte le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Lorsque la teneur en air augmente ces deux derniers paramètres sont réduits.

H.Granulats

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zones confinées, il faut en limiter le volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées.

En général ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible, ou à la baisse dans le cas contraire. Comme mentionné précédemment, le diamètre maximal D_{max} des gravillons doit rester en dessous de 20 mm pour minimiser le risque de blocage.

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible [38].

I. Temps

L'hydratation du ciment se fait dans le temps. C'est la période dormante qui donne de deux à quatre heures de maniabilité au béton. Cependant, même si la réaction d'hydratation du ciment est ralentie à ce moment, une perte de maniabilité est observable. La perte de maniabilité dans le temps peut être mesurée en termes d'augmentation du seuil de cisaillement et de l'augmentation également de la viscosité plastique.

II .Température

La température a un effet indirect sur la rhéologie du béton. Habituellement, la température joue directement sur la viscosité d'un matériau. Pour le cas du béton frais, la température est une des causes de l'augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment qui provoque la perte de maniabilité rapide dans le temps. La température exerce une influence sur la viscosité de la pâte de ciment et par conséquent sur les propriétés rhéologiques du béton mais cet effet est de beaucoup moindre importance.

I.2.2 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

Lors de son étude d'évaluation du retrait, fluage et module d'élasticité des BAP, Persson [39] a conclu que les valeurs de ces trois parmètres coïncident bien avec celles du béton vibré quand la résistance reste constante.

I.2.2.1 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles pour un béton tout comme le BAP car elles offrent généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elles sont directement reliées à la structure de la pâte de ciment hydraté. C'est la meilleure optimisation qui nous permet d'avoir un meilleur BAP avec des résistances qui peuvent aller de 60 à 100 MP à 28 jours.

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine aux bétons ordinaires. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants car un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable, ainsi qu'il est possible d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [40]. Les particules fines d'un 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.

Différentes données ont été publiées [41,42] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (Figure I.5).

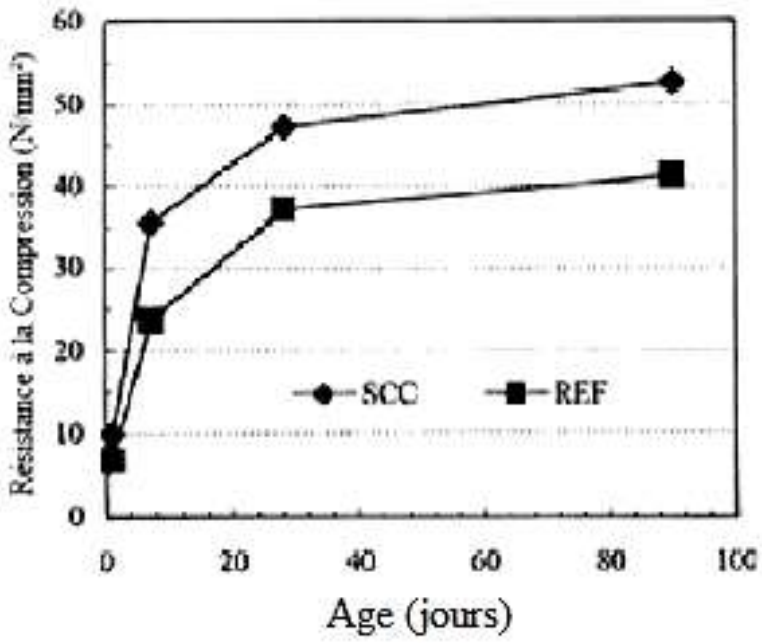


Figure I.5 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [41]

De plus, certains auteurs [43] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande.

L'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [44]. 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. Etant 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.

Selon Klug et Holchemacher [45], les résistances mécaniques des BAP et des bétons vibrés sont similaires sous des conditions comparables, mais les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment.

I.2.2.1.1.Résistance à la compression

Un béton Autoplaçant avec un rapport E/L similaire, aura généralement une résistance légèrement plus élevée en comparaison à celle du béton ordinaire à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie [45].

I.2.2.2 Résistance à la traction

Pour une résistance à la compression donnée d'un BAP, la résistance à la traction peut être assumée à être la même que celle d'un béton ordinaire comme le volume de pâte (ciment + fines + eau) n'a aucun effet significatif sur la résistance à la traction [27].

Selon Klug [45] la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferraillage.

Selon Guneyisi et Gesoglu [46] la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau.

Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al [47] ont trouvé une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction comparable à celle donnée par les réglements de Béton Armé. La relation proposée est : $f_s = 0.076f_{ck} + 0.5582$ .....

I.2.2.2 Module de Déformation Longitudinal

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les agrégats, le type et la quantité de ces derniers ainsi que les modules d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton. En choisissant des agrégats ayant un module élevé, on augmentera le module d'élasticité du béton. Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçants ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticités peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires, Assié et al [48] ont trouvé que, d'une part et malgré un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, d'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

Nassif et al [49] attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé. Or ceci, d'après les auteurs, ne peut être valable que si le seul paramètre est le rapport eau/poudre. Le module d'élasticité des bétons à haute performance est influencé par les constituants du mélange. Ainsi à jeune âge le taux de gain du module délasticité est plus élevé que celui de la résistance quand le mélange comporte des additions minérales. Le module d'élasticité des BHP utilisant le laitier et la fumée de silice augmente avec l'âge, et le taux d'augmentation devient moindre à l'approche de 28 jours, plus encore l'addition des cendres volantes réduit le taux d'augmentation du module d'élasticité avec l'âge. Avant eux Persson [39] avait trouvé que le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne diffèrent pas significativement de celles du béton ordinaire quand la résistance est constante.

Felekoglu et al [50] ont montré que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticité faibles comparés à ceux du béton traditionnel. En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte.

I.2.2.3.Retraits

Plusieurs travaux ont comparé le retrait plastique du BAP et celui du béton vibré Gram et Piiparinen [51], ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons ordinaires (Figure I.6).

Pour Turcry l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires (Figure I.7).

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon Song et al [52], le laitier remplit bien cette condition.

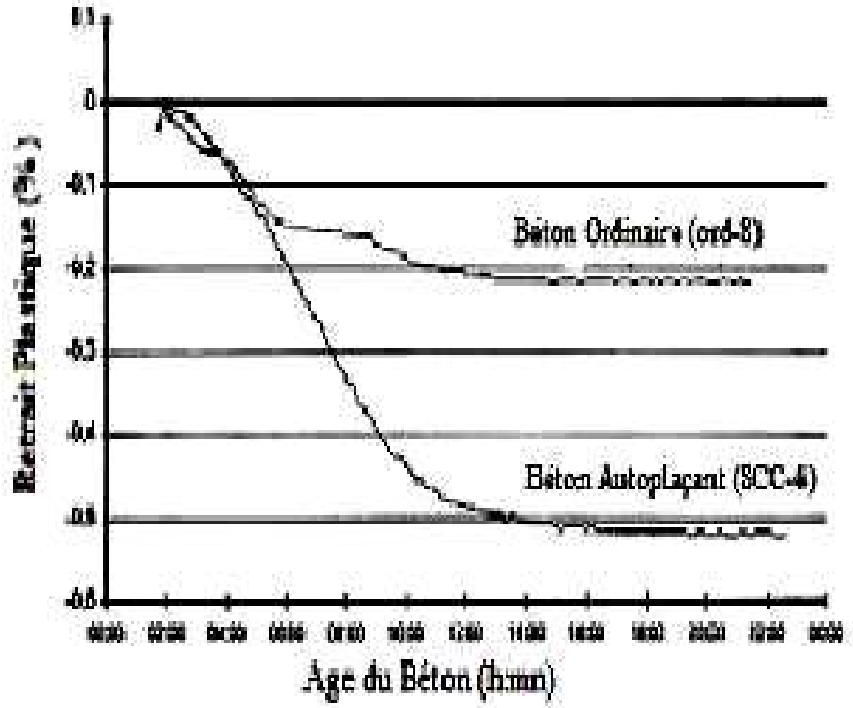


Figure I.6 : Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire [51]

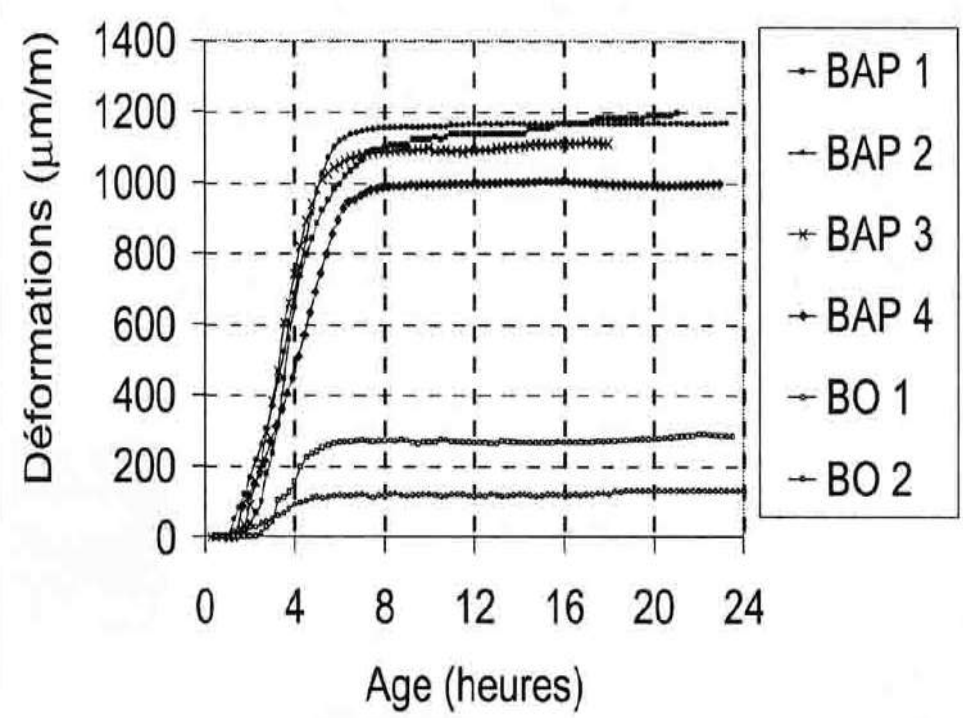


Figure I.7 : Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires [53]

En ce qui concerne le retrait endogène qui est dû à l'hydratation, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés [54]. En effet, même si certains auteurs, Hu et Barbieri [55] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres auteurs tels que Vieira et Bettencourt [56] et Pons et al [57] contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton. D'autre part, Lee et al [58] mentionnent que le retrait endogène est plus important dans les BAP que dans les bétons ordinaires, en raison du retrait chimique élevé ainsi qu'aux fines pores dans les bétons au laitier.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique est directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton est d'autant plus important que son rapport E/C est faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [57].

Les résultats disponibles de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [55] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés. Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé. D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [39]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 μm/m (à 180 jours).

Sonebi et Bartos [42] ont observé des retraits de séchage des BAP moins importants (Figure 1.16) que ceux des bétons vibrés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). L'augmentation du volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution du rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [59].

Le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates [60]. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée.

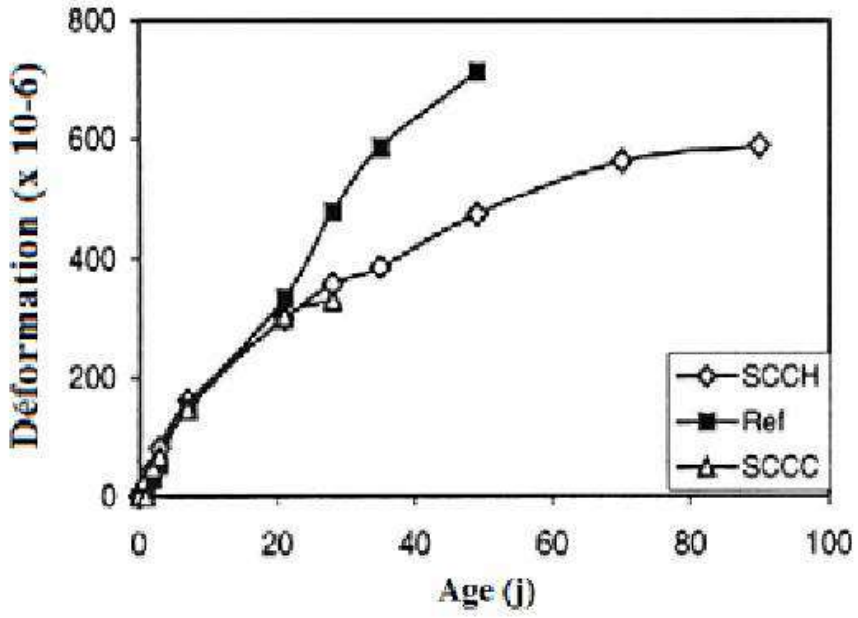


Figure I.8 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [42]

I.2.2.4. Fluage

D'après les résultats présentés par Proust [62], les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre. Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés.

Cette concordance des comportements différés sous charge est confirmée par d'autres auteurs [62,56]. De plus, selon [39], le manque de différence significative entre le fluage des BAP et celui des bétons vibrés est valable pour une gamme de résistances étendue.

Ces différents résultats concernent des formulations de BAP proches de celles des bétons vibrés, notamment avec des quantités de ciment équivalentes et des rapports E/C voisins. L'influence du volume de pâte sur les déformations sous charge des bétons n'est pas réellement confirmée. Cette éventualité n'est pas exclue mais les comportements différés des BAP paraissent comparables à ceux des bétons vibrés.

Selon Song et al [52] l'effet de la finesse du laitier est clair sur le fluage. Ce dernier diminue pour les 28 premiers jours par rapport au béton vibré. Ceci est confirmé par Jianyong et Yan [63] qui stipulent que le fluage sera fortement réduit en utilisant un laitier ultrafin. Ils ajoutent aussi que dans les mêmes conditions, le fluage d'un béton à haute performance contenant un laitier ultrafin est beaucoup plus faible que celui d'un béton sans laitier. Ils ont comparé trois mélanges de béton à haute performance, le premier (concrete A) contenant que du ciment, le deuxième (concrete B) contenant 30% de laitier et le troisième (concrete C) contenant 30% de laitier et 10% de fumée de silice. Ils ont trouvé que le fluage des deux derniers mélanges est plus faible que celui du premier mélange (Figure 1.9).

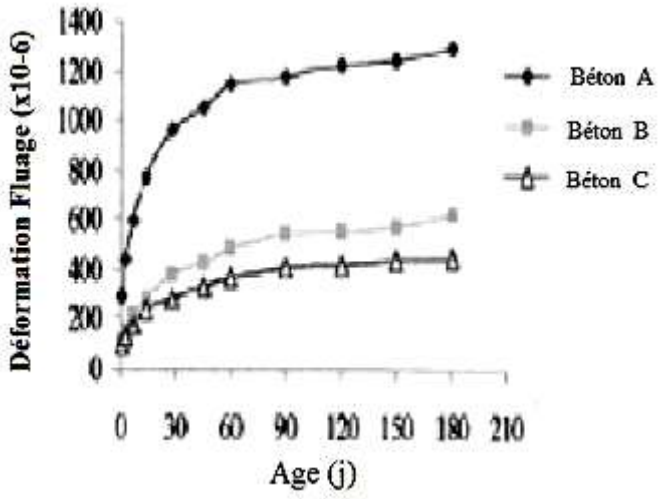


Figure I.9 : Développement du Fluage du Béton [63]

II.2.5.Adhérence avec le ferraillage

Le béton armé est basé sur une adhérence effective entre le béton et les armatures. L'efficacité de l'adhérence est affectée par la position des bars et la qualité du béton. Un enrobage adéquat est nécessaire pour transférer proprement les contraintes d'adhérence entre l'acier et le béton. Une mauvaise adhérence est généralement le résultat de l'échec du béton à bien enrober l'acier durant la mise en place ou du ressuage et ségrégation du béton avant son durcissement. La fluidité et la cohésion du béton autoplaçant minimisent ces effets négatifs.

Sonebi et Bartos [42] ont trouvé que la contrainte d'adhérence dans un BAP est entre 16 et 40% plus élevée que dans un béton ordinaire. Mieux encore, Chan et al [64] ont trouvé que, sans vibration, la contrainte d'adhérence dans un BAP est double á celle dans un béton ordinaire, et elle est meilleure que celle dans un béton à haute performance même vibré.

Recemment Valcuende et Parra [65] ont confirmé cependant le meilleur comportement du BAP en adhérence que le béton ordinaire, Domone a trouvé que la contrainte d'adhérence des BAP est très similaire à celle des bétons ordinaires.

I.2.2.6.Résistance au feu

Le béton n'est pas combustible et ne supporte pas l'étalement des flammes. Il ne produit pas de fumée, de gaz toxiques ni d'émissions quand il est exposé au feu. Le béton a un faible seuil de transfert de chaleur et retient la majorité de sa résistance. D'après le rapport de RILEM en 2008 sur la durabilité des BAP [66], la résistance au feu des bétons autoplaçants est similaire à celle des bétons ordinaires. A cause de la faible perméabilité du BAP la résistance au feu peut être considérable. Selon Persson [67], l'utilisation des fibres polypropylène a été très bénéfique aux BAP car ils contiennent des pores qui permettent l'emprisonnement des fumées.

I.2.2.7.Corrosion des armatures

Cheng et al [68] ont effectué des essais sur la corrosion des armatures dans des mélanges de béton contenant du laitier et ils ont trouvé que ce dernier diminue les pores dans le mélange, produit un mélange dense, diminue les risques de fissuration et par conséquent réduit le risque de corrosion dans les armatures. Selon Pal et al [69] l'augmentation de la teneur en laitier dans le béton diminue la quantité de corrosion dans ce dernier. Yeau et Kim [70] ont trouvé aussi qu'une grande résistance à la corrosion peut être atteinte avec une grande teneur en laitier.

Selon Hou et al [71] l'introduction du laitier dans le mélange de béton assure une faible perméabilité ce qui assure une forte résistance à la corrosion des armatures.

Très récemment Hassan et al [72] ont trouvé qu'en coulant une poutre armée en béton autoplaçant et une autre en béton ordinaire, à échelle réelle, la résistance à la corrosion a été plus élevée dans le cas du BAP que pour le béton ordinaire. Par contre la propagation des fissures a été plus facile et plus étendue dans le cas du BAP. La poutre coulée en BAP a montré une dégradation de l'enrobage, probablement dû au faible volume de gros granulats dans le mélange en BAP. Il a été constaté aussi une certaine non-uniformité du BAP le long de la poutre tout en s'éloignant de l'extrémité où le coulage est réalisé et par conséquent ils ont proposé que le point de coulage soit mobile le long de la poutre.

I.3 Caractérisation de BAP

Les caractéristiques principales des BAP résident dans les propriétés du béton à l'éta tfrais, c'est-à-dire la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. La caractérisation de ces propriétés peut être réalisée avec des moyenset un niveau de précision très variable. En effet, il n'existe pas d'essai standard ni de critère associés pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. Pour pallier cette lacune, les chercheurs ont développé différents types d'essais sur mortier et sur béton [73] [74].

I.3.1. Essais sur mortier

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode que tester un béton.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement. Un seuil de cisaillement entre 20 et 50 Pa et une viscosité plastique entre 6 et 12 Pa.s ont été suggérés comme appropriés [73] [74]. La mesure du seuil de cisaillement et de viscosité plastique nécessitent un rhéomètre, dans le cas ou cet appareil est non disponible, des essais alternatifs plus simples sont proposés pour évaluer la fluidité du mortier comme l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs (Figures 1.5 et 1.6) [73].

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. Dans l'essai de l'entonnoir (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

Nawa et al [75], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. Quand à Chai, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s [76].

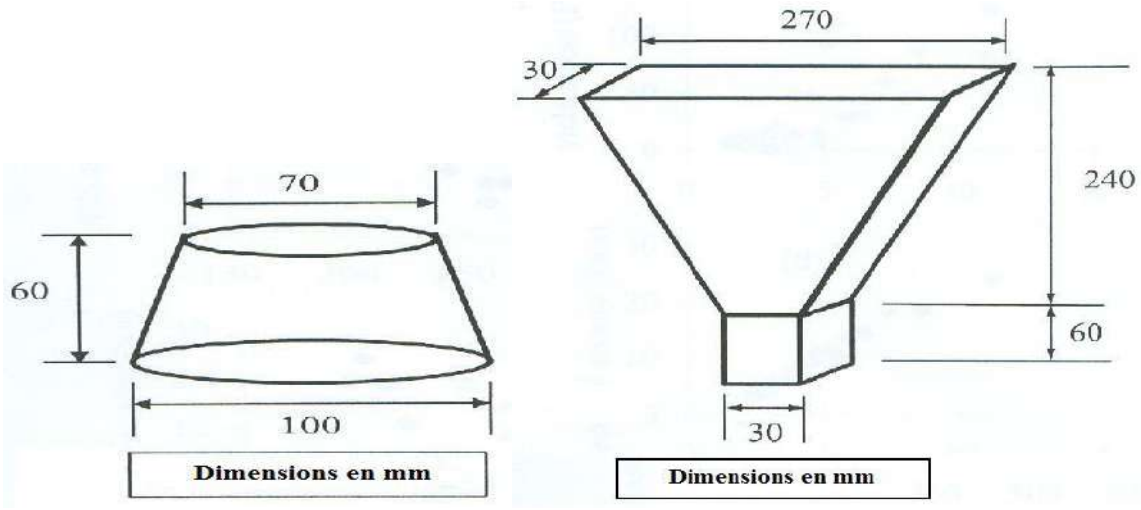


Figure I.10 : Essai d'entonnoir pour les mortiers

I.3.2 Essais sur béton frais

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier en termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage. Nous présenterons dans cette partie les principaux tests d'ouvrabilité pour la caractérisation des bétons autoplaçants.

I.3.2.1. Essai de l'étalement au cône d'Abrams

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm. L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône, ainsi que le temps au passage à un diamètre de 50 cm [77].

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton [78] [79].

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier) [38]. Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Le T50 est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T50, traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Toutefois, le T50 est une valeur difficile à mesurer, surtout pour le cas des bétons très fluides ; lancer et arrêter le chronomètre au moment où le cône est levé et où le béton passe au diamètre de 50 cm est une estimation subjective. En général, pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [80] [81]. Cependant, centrés avant de relever le cône et observer l'étalement du béton à travers les armatures. Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre les armatures sont différents selon les auteurs et les pa ortées par [82] : certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation [83] [84].

I.3.2.2 Essai d'Etalement au Mini-Cone

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est le retenu.



Figure I.11 : Essai d'Etalement pour mortier

I.3.2.3 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.



Figure I.12 : Essai à l'Entonnoir pour mortier

I.3.2.4 Essai à la Couronne J (J-Ring test)

L'essai à la couronne J (J-ring test) consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50J} et le blocage.

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

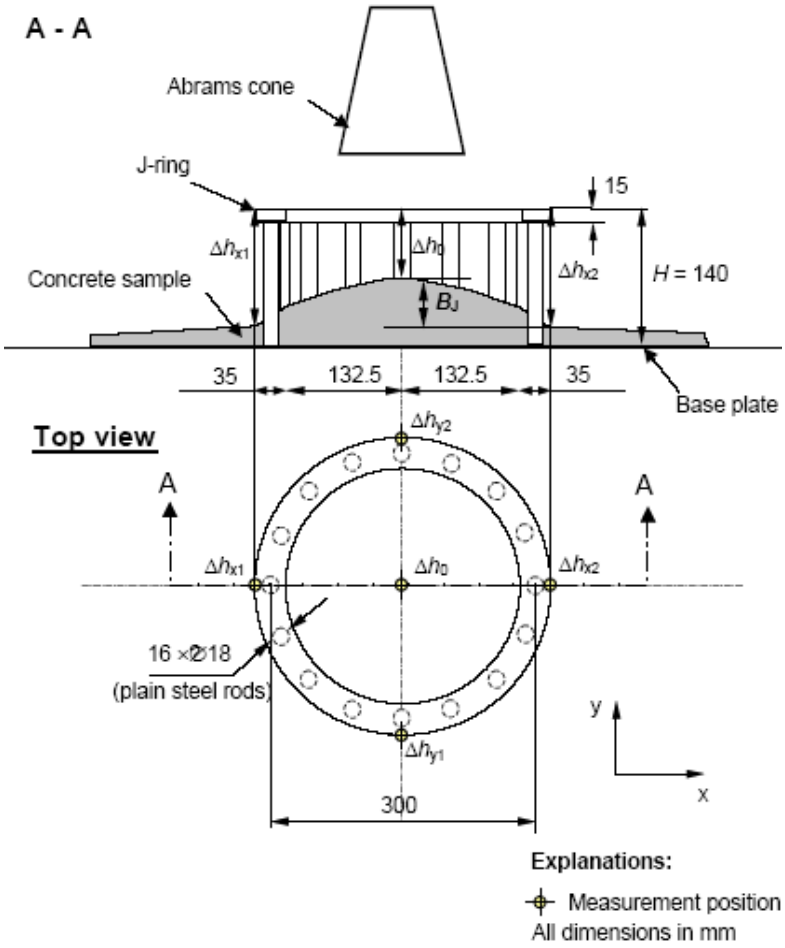


Figure I.13 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de Différence d'Hauteurs

I.3.2.5 Essai à la boite en L (L-Box test)

Avec l'essai à la boite en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm), soit environ 12,7 L de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos 1 minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale.

Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange.

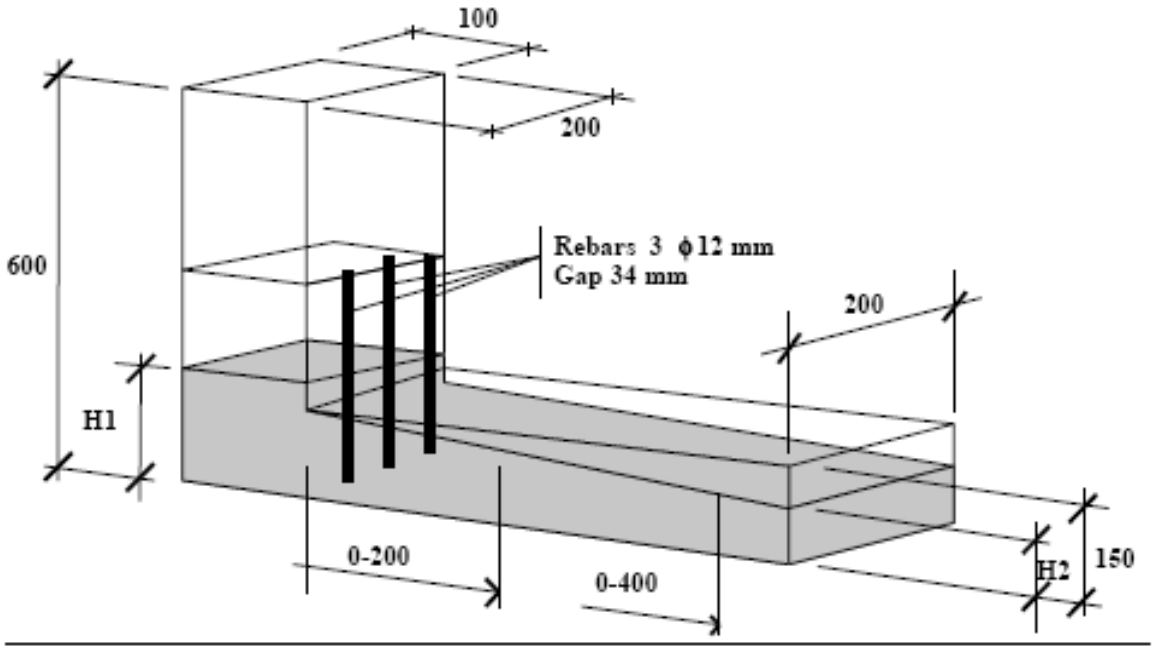


Figure I.14 : La boite en L

Mesures à prendre

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (Dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (Dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2 (Voir figure 1.14).

On peut alors calculer le rapport H2/H1. Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. Les deux, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferraillage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L, on pourra dire que ce béton est homogène. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant.

I.3.2.6 Essai à la boite en U (U-Box test)

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (Figure 1. 15) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale (h_2-h_1=0). Un béton peut être considéré comme autoplaçant si cette différence d'hauteur se rapproche le plus cette valeur nulle.

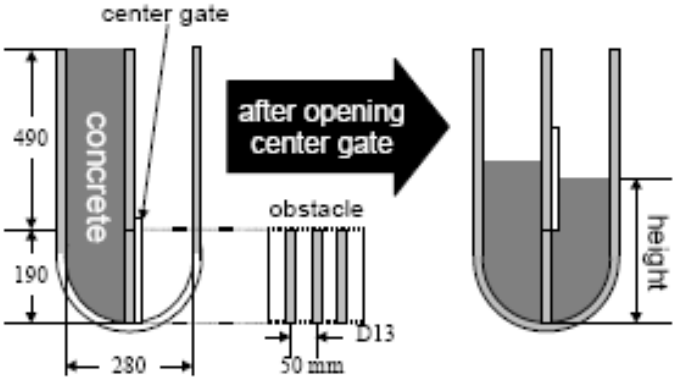


Figure I.15 : Essai à la boite en U

I.4 Formulations et Compositions des BAP

La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m^3. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m^3. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP.

Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis [85].

Réaliser 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 des BAP.

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.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et de ses quelques modifications.

I.4.1.Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, d'après Ozawa et al rapporté par [86]. Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances. Le principe de cette méthode est le suivant:

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés :

$$G = \frac{50}{100} G_{\lim}(1 - A) \qquad \text{(I.3)}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier:

$$S = \frac{40}{100}\frac{(1-A-G)}{(1-K_{sf})} \qquad \text{(I.4)}$$

Où: K_{sf} = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier, donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} \qquad \text{(I.5)}$$

Avec r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \qquad \text{(I.6)}$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V est exprimé en secondes

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de Γ_m est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée). Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0{,}1$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant

I.4.2 Formulations modifiées de la méthode générale

La méthode générale n'est pas adaptée pour formuler des bétons avec des agents de viscosité, pourtant elle conduit à la formulation de bétons très visqueux [87]. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. Les modifications ont touché surtout les dosages en gravier et en sable.

I.4.2.1 Kochi University of Technology (Japon)

Edamatsu et al [88] ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) d'augmenter le dosage de sable dans le mortier à plus que 40% et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

I.4.2.2.University of Tokyo (Japon)

Ouchi et al rapporté par [86] ont proposé une méthode plus rationnelle pour déterminer une combinaison satisfaisante du rapport eau/poudre et du dosage en superplastifiant que celle utilisée dans la méthode générale. Chaque paramètre est déterminé indépendamment, afin de minimiser le nombre de tests demandés. Ces tests ont montré que la relation entre l'étalement relatif G_m et la vitesse relative d'écoulement R_m est linéaire pour n'importe quelle valeur du dosage du superplastifiant (rapport Sp/P en masse) et pour n'importe quel rapport eau sur poudre (E/P en volume), et á la forme :

$$R_m = A \cdot \Gamma_m^{0,4} \qquad \text{(I.7)}$$

I.4.2.3.Delft University (Denmark)

Travaillant avec des matériaux locaux, Pelova et al rapporté par [86], ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, tout en limitant la dimension maximale des granulats D_{max} à 16 mm, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

I.4.2.4.Méthode de Domone (U.C.L. Grande Bretagne)

Selon [86] Domone a proposé les modifications suivantes, sans utilisation d'agent de viscosité:

- Augmenter le volume du sable dans le mortier
- Introduire des ajouts minéraux dans la pâte de ciment
- Obtenir le rapport maximum eau/poudre, en utilisant le test d'étalement au cône sur mortier, de manière à assurer la résistance à la ségrégation.
- Déterminer le dosage en superplastifiant de la même manière que la méthode générale.
- Tester le mélange de béton à :
- L'étalement : jusqu'à obtenir des valeurs entre 650 et 700 mm.

I.4.3 Autres formulations

- Formulation CBI (Suède)
- Méthode CBI modifiée
- Formulation JSCE (Japon)
- Formulation LCPC (France)
- Formulation de l'Université de Sherbrooke (Canada)

I.5. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux BAP, bétons de fabrication récente, par rapport à celle des bétons traditionnels, que l'on peut considérer être connue. L'étude bibliographique menée est consacrée á la présentation des propriétés physiques, mécaniques et á la durabilité des bétons autoplaçants. On s'intéresse à la durabilité des BAP surtout vis-à-vis les agressions chimiques. Deux attaques chimiques seront considérées dans cette étude : l'attaque par les sulfates et l'attaque par les acides.

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Le béton autoplaçant est apparu dans les années 90 au japon. Le BAP est un béton très fluide, dont la spécificité est de se mettre en place sans vibration, sous le seul effet de son poids propre. Son utilisation contribue à améliorer les conditions sur chantier. Les BAP se composent d'un grand volume de pâte riche en fines associé à une faible proportion de granulats dont la fluidité est améliorée par l'utilisation de superplastifiants et éventuellement d'agent de viscosité.

A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition. Du point de vue mécanique, l'emploi d'additions minérales multiple le site de nucléation améliorant la résistance au jeune âge. A long terme, le comportement mécanique peut être comparé aux bétons vibrés. Mais, dans certains cas, le volume de pâte élevé peut avoir un effet réel mais limité sur le comportement mécanique entraînant soit une augmentation, soit une diminution de ces propriétés.

Une réflexion a été menée sur les méthodes de formulation des BAP. Différentes méthodes trouvées dans la littérature découlent des trois approches : Optimisation du mortier, optimisation de la quantité de la pâte de ciment, optimisation de squelette granulaire. Ces méthodes demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP. A l'heure actuelle, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires.

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser l'approche japonaise parce qu'elle est sécuritaire en conséquence du dosage de pâte élevé, elle ne nécessite pas d'outil informatique et sa procédure de réalisation est très simple. L'utilisation de superplastifiant et d'une grande quantité de pâte est alors nécessaire pour obtenir un matériau très fluide.

A travers les études menées sur la durabilité des bétons autoplaçants, nous avons constaté qu'il existe une relation entre la composition du BAP (type de ciment, type d'addition minérale dans la pâte de ciment), les propriétés de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) et la résistance chimique (carbonatation, attaque sulfatique et attaque acide) de ces matériaux cimentaire. Les travaux concernant l'effet du sable sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP sont peu nombreux. Généralement les études se focalisent sur l'effet du sable sur la fluidité des BAP et en particulier la fluidité des mortiers, ce qui signifie clairement qu'un besoin en recherche est nécessaire dans l'étude de l'influence de la qualité et de la nature des sables sur les propriétés physiques, mécaniques et durabilité des BAP. Par conséquent, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de différents types de sable de nature et de qualité différente sur les performances physico-mécaniques et la durabilité des BAP surtout vis-à-vis les agressions chimiques tels que les attaques des sulfates et les attaques des acides.

II.1.INTRODUCTION

Le sable constitue l'agrégat essentiel dans la fabrication des mortiers et des bétons, c'est un mélange de grains inertes qui entre dans la composition du béton pour assurer la continuité granulaire entre le ciment et gravier d'une part et une meilleure cohésion du béton d'autre part. Leur utilisation dans le béton a une raison à cause de ses propriétés mécaniques, physiques, chimiques et thermiques qui influent positivement sur le béton.

II.1.1. Définition

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation de roches sous l'action de divers agents d'érosion (vent, eaux courantes, gel). [89]

D'une manière générale, (selon la norme NA 523-1990) [90], on appelle sable, le mélange meuble de grains de diamètre variant de 0 à 6.3mm de provenance naturelle ou artificielle. Le sable constitue l'agrégat essentiel dans la composition des mortiers, bétons et des matériaux préfabriqués où il assure la continuité granulaire entre le ciment et le gravier d'une part et une meilleure cohésion du béton d'autre part, de plus il participe à la résistance à l'écrasement.

II.1.2. Origine et formation géologique

Le sable provient de l'érosion et de l'altération de roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques.

En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morpho scopie) au cours des temps géologiques: les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider, se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaire). [89].

II.2.CLASSIFICATION DES SABLES

II.2.1.Selon l'origine

II.2.1.1 Les sables détritiques

Les sables détritiques (issus de roches préexistantes) sont dits « terrigènes » lorsqu'ils sont formés par altération météorique (pluie, neige) ou par érosion de roches grenues (granite, gneiss, etc.). Dans ce cas, ils sont transportés par les cours d'eau. Ces sables peuvent également provenir des éruptions explosives qui émettent des sables volcaniques (autrement dit des cendres).

Des sables détritiques, dits « reliques », se forment également sur les plateaux continentaux aux cours des fluctuations climatiques et des variations successives du niveau des mers. Ces sables se retrouvent alors en contrebas des marges continentales, grâce au transport réalisé par les courants de turbidité. Suivant la force du transport, les sables fluviatiles peuvent atteindre la mer. Ils créent alors des deltas et des plages sur le littoral. [89]

II.2.1.2. Les sables éoliens

Les sables éoliens s'accumulent en bordure des régions côtières (dune du Pilat dans le bassin d'Arcachon, par exemple) et dans des zones désertiques (les ergs du Sahara, par exemple) sous l'effet du vent. Les sables bioclastiques, appelés aussi sables coquilliers, proviennent quant à eux de la fragmentation puis de l'accumulation de squelettes ou coquilles d'organismes marins (mollusques, coraux, etc.). Les sables coquilliers recouvrent les plages de couleur très claire que l'on rencontre sous les tropiques. [89]

II.2.2. Selon la nature

- Sables roulés (naturel).
- Sables concassés (artificiel). [91]

II.2.3. Selon la grosseur des grains

Les sables sont classés selon la grosseur des grains, on distingue :

- Les sables fines qui sont composés essentiellement de grains de dimension inférieure à 0.08mm.
- Les sables fins qui sont composés essentiellement de grains de dimensions allants de 0.08mm à 0.315mm.
- Les sables moyens qui sont composés de grains de dimensions allants de 0.315mm à 1.25mm.
- Les sables grossiers qui sont composés de grains de dimensions allants de 1.25mm à 6.3mm. [92]

II.2.4. Selon la masse volumique

- Sable léger : masse volumique < 2000Kg/m^3.
- Sable courant : masse volumique compris entre 2000 et 3000 Kg/m^3.
- Sable lourd : masse volumique >3000 Kg/m^3. [91]

II.3. PROPRIETES DES SABLES

II.3.1. Composition minéralogique

Les sables sont principalement constitués de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants majoritaires : on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux. [89]

II.3.2. Composition chimique

Le sable est un matériau qui contient les éléments chimiques suivants :

(SiO_2 – Al_2O_3 – Fe_2O_3 – Cao – K_2O – SO_3), chaque élément a un pourcentage précis mais qui varie d'un sable à l'autre.

Des chercheurs ont déduit les valeurs suivantes pour chaque élément chimique

Tableau II.1.Composition chimique des différents sables [92]

Constituant	Sable concassé	Sable de mer	Sable de dune	Sable d'oued
SiO_2	2.50	46.48	94.19	83.65
Al_2O_3	2.63	3.68	1.95	4.50
Fe_2O_3	0.58	0.29	0.41	0.53
CaO	70.69	50.00	2.59	5.17
K_2O	/	/	1.14	2.28
SO_3	traces	Traces	traces	Traces

II.4. PROPRIETES PHYSIQUES

II.4.1. la forme des grains d'un sable

L'étude de la forme des grains, qui peut sembler superflue au premier abord, donne néanmoins sept catégories de formes différentes :

- ***Rond*** : les grains sont lisses et ressemblent à des billes.
- ***Rond à semi angulaire*** : la forme de la plupart des grains, encore très arrondis, commence à devenir semi angulaire.
- ***Semi angulaire à rond*** : Il y a davantage de grains à tendance semi- angulaire que de grains à tendance sphérique.
- ***Semi angulaire*** : grains dont la surface présente des angles bien visibles mais dont l'aspect général revêt une forme arrondie.
- ***Semi angulaire à angulaire*** : l'ensemble des grains tend à devenir angulaire.
- ***Angulaire à semi angulaire*** : les plus petits grains sont angulaires alors que les plus gros sont semi angulaires (arrondis au lavage).
- ***Angulaire*** : les grains montrent des arêtes vives. [93]

II.4.2. Porosité

La présence de pores internes dans les sables est en rapport direct avec la densité des sables et effectivement les caractéristiques de ces pores sont très importantes dans l'étude des propriétés des sables.

La porosité des sables, leur imperméabilité et leur absorption influencent certaines de leurs propriétés : leur liaison avec la pâte de ciment hydraté, leur stabilité chimique, leur résistance à l'abrasion ainsi que la résistance du béton au gel et au dégel. Comme décrit ci-dessus, la densité d'un sable dépend aussi de sa porosité et le rendement du béton pour une masse donnée de sable en est affectée.

La taille des pores des sables est très variable : les plus gros peuvent être vus au microscope ou même à l'œil nu ; les plus petits sont à peine plus gros que les pores de la pâte de ciment. Les pores inférieurs à 4 μm sont d'un intérêt particulier : il est généralement admis qu'ils affectent la durabilité des sables soumis à des cycles de gel dégel.

Certains pores sont complètement à l'intérieur des sables ; d'autres débouchent à la surface. La pâte de ciment, en raison de sa viscosité, ne peut pénétrer à une grande profondeur comme elle le fait dans les plus gros pores ; c'est alors le volume global des grains qui est considéré comme solide pour la détermination des quantités ou proportions de sables dans le béton. Quoi qu'il en soit, l'eau peut pénétrer dans les pores ; la quantité et le taux de pénétration dépendant de leur taille, de leur communication entre eux et de leur volume total. Puisque les granulats représentent environ les trois quarts du volume du béton, il est clair que leur porosité contribue à la porosité globale du béton. [94]

La porosité "P" d'un granulat est donnée par la relation **:**

$$P = \frac{v}{V}.100(\%) \qquad \text{(II.1)}$$

Tel que : $''v''$ est le volume des vides contenus dans l'unité de volume $''V''$

II.4.3. Granulométrie d'un sable

Il est indispensable de connaître dans un sable la grosseur des grains dont il se compose et leur proportion dans un volume de sable déterminé. Cette analyse porte le nom : analyse granulométrique. L'analyse granulométrique est définie par la Norme Algérienne : NA 2607-1990. [95]

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes , Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisas sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous forme graphique (Voir Fig II.1). [92]

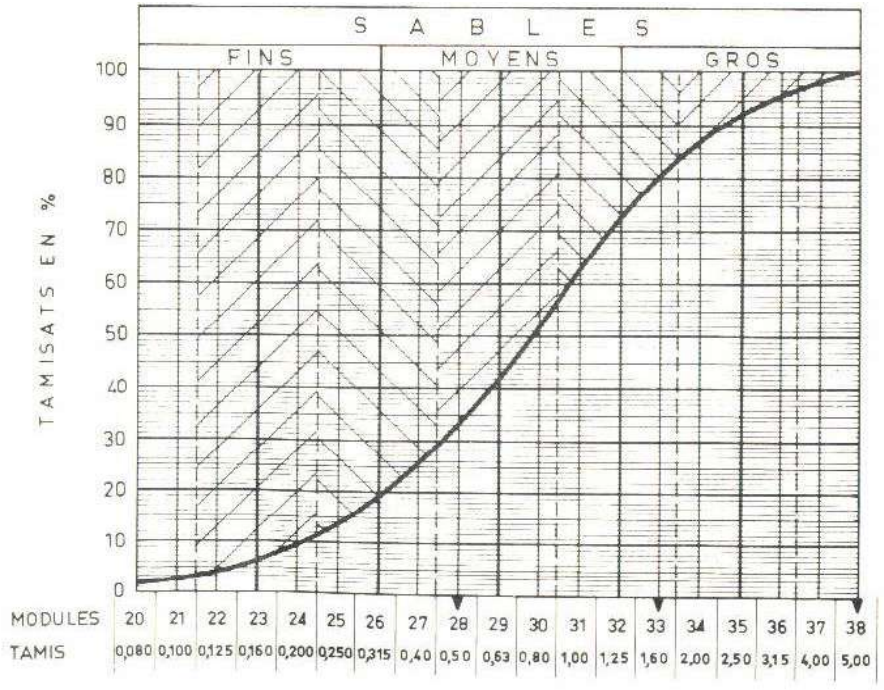


Figure II.1 : Courbe granulométrique d'un sable [90]

L'importance de la composition granulométrique

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de plusieurs facteurs. Généralement on souhaite obtenir un béton résistant, étanche et durable. Pour atteindre ce but, il faut :

- que le béton à l'état frais soit facile à mettre en œuvre et à compacter (pour réduire la porosité).
- un maximum de granulats par unité de volume de béton (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides, tous les vides devant être remplis de pâte liante).
- un minimum de surface spécifique (pour réduire la quantité d'eau de gâchage et obtenir un rapport C/E plus élevé).

Par ailleurs :

- il faut choisir D max aussi grand que le permet la dimension minimum de la pièce à bétonner et l'encombrement des granulats.
- la proportion de chaque dimension des grains doit être choisie de façon à remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures.

- il faut réduire la teneur en éléments fins au minimum requis pour obtenir une bonne maniabilité et une bonne compacité.

II.4.4. Module de finesse :

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimée en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante :

0.16 - 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80mm.

Les tamis concernés pour les sables sont :

0.16 - 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5mm

Le module de finesse est une caractéristique importante pour les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 (Voir Figure II.2).

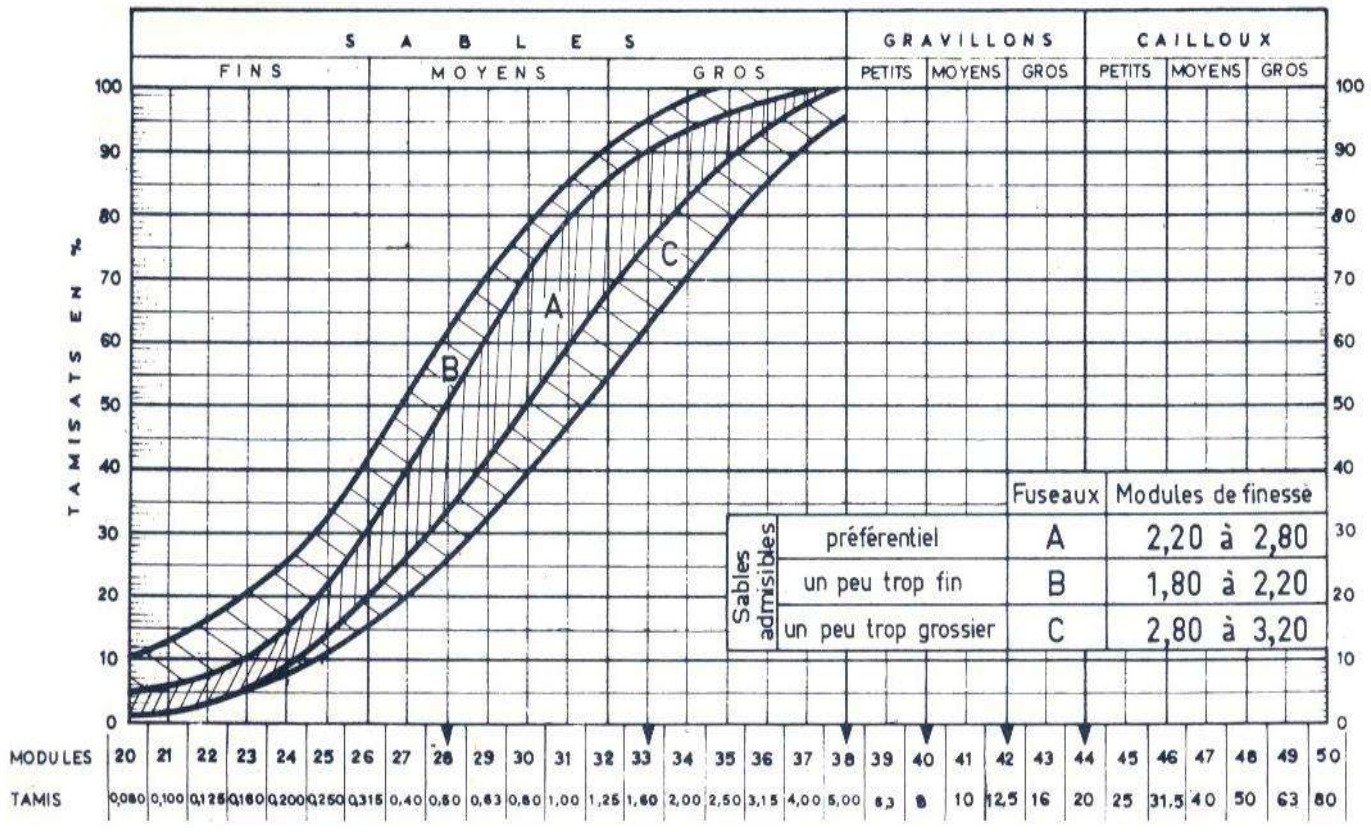


Figure II.2 : Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton.

II.4.5. Propreté d'un sable

II.4.5.1.Equivalent de sable

Cet essai est défini par la norme Algérienne NA.455/1990 [96], qui a pour but de déterminer "L'Equivalent de sable" de certains sols ou granulats. Cette norme fixe la méthode de détermination de cette caractéristique. Le but de l'essai est d'évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, il s'agit de déceler la présence d'éléments fins dans un sable.

Par définition, l'équivalent de sable d'une mesure d'essai est :

$$ESP = \left(\frac{H'_2}{H_1}\right) * 100 \quad \text{(à piston)} \qquad \text{(II.2)}$$

Avec : $H'_2 = H_2$: hauteur du sable propre seulement

$$ESV = \left(\frac{H_2}{H_1}\right) * 100 \quad \text{(à vue)} \qquad \text{(II.3)}$$

Avec : H_1 : hauteur du sable propre avec des éléments fins

L'équivalent de sable d'un échantillon est la moyenne arithmétique des équivalents de sable déterminés.

Le tableau II.2**.** Résume les valeurs préconisées de l'équivalent de sable mesuré à vue et à l'aide d'un piston.

Tableau II.2. Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [92]

ES à vue	***ES piston***	***Nature et qualité du sable***
ES < 65	*ES < 60*	*Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour les bétons de qualité*
65≤ES<75	*60≤ES<70*	*Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de Qualité Courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.*
75≤ES<85	*70≤ES<80*	*Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité*
ES ≥85	*ES ≥80*	*Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.*

II.5. Propriétés mécaniques

II.5.1. Liaison des sables

La liaison entre les sables et la pâte de ciment est un facteur important de la résistance des bétons, spécialement de la résistance à la flexion. Toutefois, la nature de la liaison est mal connue. La liaison est engendrée en partie par l'imbrication des sables et de la pâte de ciment hydraté due à la rugosité de la surface des sables. Une surface plus rugueuse, comme celle des sables concassés, génère une meilleure liaison en raison de l'imbrication mécanique ; une meilleur liaison est aussi généralement obtenue avec des sables moins durs, plus poreux et ayant une minéralogie hétérogène.

Généralement, les caractéristiques de texture qui ne permettent pas la pénétration de la surface du grain ne sont pas favorables à la création de bonnes liaisons. De plus, les liaisons sont affectées par d'autres propriétés physiques et chimiques des sables, et ce, en relation avec leur composition chimique et la condition électrostatique de leur surface. Par exemple, des liaisons chimiques peuvent exister dans le cas des calcaires, des dolomies et, éventuellement, des sables siliceux. Aussi, à la surface des particules polies, des forces capillaires peuvent se développer. Cependant, la relation entre ces phénomènes est mal connue et, en pratique, il n'est pas facile de prédire la liaison entre le sable et la pâte de ciment hydraté qui l'entoure. Dans tous les cas, pour obtenir un bon développement des liaisons, il est nécessaire que la surface des grains soit propre et libre de toute trace de particules d'argile. [94]

II.5.2. Résistance des sables

La résistance à la compression du béton ne peut excéder de manière significative celle de la plupart des granulats qu'il contient : cependant, il n'est pas facile d'établir la résistance propre de chaque granulat, car il est difficile de soumettre chaque granulat à un essai de résistance au broyage. L'information requise est normalement obtenue par des essais indirects : résistance à l'usure d'un ensemble de granulats, effort nécessaire pour compacter un ensemble de granulats et performance des granulats dans le béton.

En général, la résistance et l'élasticité du granulat dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure. Ainsi, une faible résistance peut être due à la faible résistance des constituants des grains ou, bien que les grains soient résistants, au fait qu'ils soient mal cimentés entre eux. [94]

II.5.3. La dureté des sables

Elle est définie comme étant la résistance d'un échantillon de roche à se briser sous un choc. Quoique cet essai permette d'écarter les roches ayant subi des phénomènes météoriques, il n'est pas utilisé.

La présence d'impuretés autour des grains peut également compromettre l'adhérence, avec de plus un risque de réaction délétère. La présence d'excès d'argile ou de pyrite est susceptible de provoquer des gonflements à long terme dans le béton, les dégradations les plus redoutées sont celle qui est provoquées par l'alcali réaction.

Certains sables contenant une fraction significative de silice soluble et réactive (généralement amorphe) sont susceptibles, dans un environnement riche en alcalin, de provoquer à leur périphérie la formation de gels gonflants la propension des sables à engendrer ce type de phénomène s'apprécie dans divers essais, qui permettent de distinguer les catégories suivantes : sables non réactifs, potentiellement réactifs avec effet de pessimum et réactifs.

Des sables non gélifs sont indispensables pour formuler des bétons devant résister à des environnements comportant des phases de gel modéré ou sévère. [97]

Tableau II.3. L'essai qui détermine la caractéristique mécanique

caractéristiques	Norme de mode opératoire	But de l'essai	Domaine d'application
Friabilité des sables (FS)	P 18-576	Détermination de la résistance à l'usure des sables. En fonction des usages, les valeurs maximales tolérées vont de 40 à 60.	Sables pour certaines techniques routières

II.6.PROPRIETES CHIMIQUES

II.6.1. Réaction alcalis silice

Il existe trois principaux types d'alcali réaction, selon la nature des phases réactives en jeu.

Dans les réactions de types alcali silice, les minéraux du groupe de la silice se retrouvent en déséquilibre thermodynamique par rapport au gisement dont ils sont issus lorsqu'ils sont plongés dans un milieu à PH élevé comme le béton. Ainsi, certaines roches contenant des formes de silice amorphe ou microcristalline peuvent réagir avec les alcalins apportés essentiellement par le ciment. Au contact du calcium, la silice en solution forme généralement un gel polymérisé, hydrophile et expansif. Le mécanisme réactionnel généralement admis comporte deux stades.

Le premier correspond à la neutralisation des groupes silanes Si-OH par les ions OH^- présents dans la solution interstitielle du béton, le second, à l'attaque des ponts siloxanes par les ions OH- selon les réactions:

$$Si\text{-}OH + OH^- \longrightarrow Si\text{-}O^- + H_2 \longrightarrow Si\text{-}O\text{-}Na \text{ (ou K)}$$

$$Si\text{-}O\text{-}Si + 2OH^- \longrightarrow 2Si\text{-}O^- + H_2O$$

Les réactions de types alcali silicate se produisent en présence de granulats polyphasés complexes.

Il semblerait que, contrairement à la réaction alcali silice, ce type de réaction ne formerait pas ou peu de gels siliceux mais provoquerait plutôt l'exfoliation et l'expansion de certains minéraux phylliteux. [98].

II.6.2. Réaction alcali carbonate

Un autre type de réaction alcalis- granulats est celle qui a lieu entre quelques calcaires dolomitiques et les alcalis du ciment. Le volume des produits de cette réaction est plus faible que le volume des matériaux d'origine ; les mécanismes de détérioration de cette réaction sont donc différents de ceux observés dans la réaction alcali silice. Il semble que les gels formés gonflent d'une manière similaire à l'argile. Dans des ambiances humides, il y aura alors dilatation du béton. Généralement, des auréoles de réaction d'environ 2 mm se forment autour des granulats réactifs.

La fissuration se développe dans ces auréoles et conduit à la formation d'un réseau de fissures et à la perte de l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment.

Des essais ont démontré qu'un phénomène de dédolométisation se produit, c'est-à-dire une modification de la dolomie Ca Mg $(CO_3)_2$ en $CaCO_3$ et en Mg $(OH)_2$. Toutefois, les réactions en cause ne sont pas encore comprises parfaitement, en particulier le rôle de l'argile dans les granulats n'est pas clair bien que la réaction expansive semble toujours être associée à sa présence. De plus, dans les granulats expansifs, la dolomie et les cristaux de calcite sont très fins. La dilatation pourrait être causée par l'absorption d'humidité par l'argile sèche, la dédolométisation étant seulement nécessaire afin de favoriser l'accès d'eau vers l'argile emprisonnée. Une autre suggestion permet de penser que l'argile augmente la réactivité du granulat en favorisant la formation de $Mg(OH)_2$, de gel de silice et de carbonate de calcium à partir de la dolomie et des silicates de calcium, créant ainsi une augmentation de volume d'environ 4%. Une excellente analyse du problème est présentée par Walker.

Il faut mentionner que seuls certains calcaires dolomitiques provoquent des réactions expansives dans le béton. Aucun essai simple n'a été développé pour les identifier. En cas de doute, un examen de la texture de la roche ou une évaluation de la dilatation dans une solution d'hydroxyde de sodium (ASTM C 586-92) peut être effectué si l'expansion des échantillons de roche lors de l'essai ASTM C 586-92 dépasse 0,10 %. [94]

II.6.3. Contamination par le sel

Un sable provenant du bord de mer ou qui a été dragué, soit en mer, soit dans un estuaire de rivière, tout comme un sable de désert, contient du sel et doit être traité.

A cause du risque de corrosion des armatures par des chlorures, la norme BS 8110 précise la quantité maximale d'ions chlore qui peuvent être présents dans un béton. Les chlorures peuvent provenir de tous les composants du mélange. Comme les granulats sont également concernés, la norme BS 882 présente des directives portant sur la quantité maximale d'ions chlore pouvant se trouver de façon acceptable dans les granulats. [95]

II.7. PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

II.7.1. L'humidité des sables

Dans le béton frais, le volume occupé par les granulats est celui qui inclut tous les pores. Si aucun déplacement d'eau ne peut se faire dans les granulats, les pores doivent être pleins d'eau, c'est-à-dire que les sables et les graviers doivent être en condition saturée. Par ailleurs, l'eau de surface va s'additionner à l'eau du mélange et occuper un volume excédant celui de grains. L'état de base des granulats est ainsi saturé et superficiellement sec.

Les granulats exposés à la pluie peuvent amasser une quantité considérable d'eau à leur surface et mise à part la surface des tas de stockage, ils peuvent conserver cette humidité pendant longtemps. Ceci est particulièrement vrai pour les granulats fin: leur humidité libre ou de surface, en plus de celle continue dans les granulats en condition saturée et superficiellement sèche, doit être prise en considération dans la formulation des bétons, les granulats concassés contiennent rarement plus de 1% d'humidité de surface, mais les granulats fins peuvent en contenir jusqu'à 10%. L'humidité de surface est exprimée en pourcentage de la masse des granulats saturés et superficiellement secs : on parle alors l'humidité des granulats.

Comme l'humidité varie avec la température et qu'elle change aussi d'un endroit à l'autre du cas de stockage, l'humidité des granulats doit être déterminée fréquemment selon plusieurs méthodes.

La plus ancienne consiste simplement à trouver la perte de masse d'un échantillon de granulats lorsqu'il est chauffé dans un plat par une source de chaleur. Il faut éviter un séchage excessif: le sable doit être amené à un état d'écoulement libre sans plus. Cette étape peut être déterminée par le toucher ou en mettant le sable dans un moule conique : quand le moule est enlevé, le matériau doit s'affaisser sans contrainte, de façon fluide. Si le sable a acquis une teinte brunâtre, c'est le signe d'un séchage excessif. Cette méthode de détermination de l'humidité d'un granulat, appelée familièrement "méthode de la poêle", est simple, facile à appliquer sur le chantier et tout à fait fiable.

En laboratoire, le pourcentage d'humidité peut être déterminé au moyen d'un pycnomètre. La densité apparente du granulat sur une base saturée et superficiellement sèche"S", doit être connue. Ensuite, si "B" est la masse du pycnomètre plein d'eau,"C" la masse de l'échantillon humide et "A" la masse du pycnomètre avec l'échantillon et complétée avec de l'eau. Le pourcentage d'humidité du granulat est :

$$\left[\frac{C}{A-B}\left(\frac{S-1}{S}\right)-1\right]*100 \qquad \text{(II.4)}$$

L'essai est long et demande une grande attention puisque tout l'air doit être expulsé de l'échantillon, mais donne de bons résultats. Cette méthode est décrite dans la norme BS 812 (France). [93]

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

II.7.2. L'absorption d'eau

L'absorption de l'eau par les sables est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement. Le rapport entre l'augmentation de la masse et la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption.

L'absorption de l'eau par les sables entraîne également une certaine perte de maniabilité dans le temps, mais, au-delà de 15 minutes, les pertes deviennent faibles parce que l'absorption d'eau par les sables secs ralentie ou arrêtée en raison de l'enrobage des grains par la pâte du ciment. Il est souvent plus utile de déterminer la quantité d'eau absorbée au bout de 10 ou 30 minutes plutôt que l'absorption complète d'eau qui, en pratique, ne sera peut être jamais atteinte.

Le coefficient d'absorption d'eau des granulats est donné par la relation [94]:

$$A_b = \frac{(M_a - M_s)}{M_s} * 100\% \qquad \text{(II.5)}$$

II.7.3. La perméabilité

L'eau de pluie descend dans le sol par les pores qu'il présente et humecte ainsi les particules du sol. La perméabilité est la plus ou moins grande facilité que présente le sol à laisser l'eau descendre vers les couches inférieures. Cette propriété est donc bien en relation avec l'importance des espaces lacunaires. Elle s'exprime en cm/heure.

Un sable très fin ayant un pourcentage en micropores élevé, aura une vitesse de filtration faible, d'où l'importance du choix des matériaux lorsqu'il s'agit de sable de bunkers. [93]

II.7.4. Le foisonnement des sables

Il s'agit de l'augmentation de volume d'une masse donnée de sable due à des films d'eau repoussant les particules de sable les unes des autres. Alors que le foisonnement en soi n'affecte pas les proportions massiques des matériaux, dans le cas où les proportions des matériaux sont déterminées en volume, le foisonnement a pour effet qu'une plus petite masse de sable occupe le volume prévu dans la composition. Il s'ensuit que le béton fabriqué manque de granulat fin et apparaît trop chargé en cailloux. Le béton peut alors se ségréger ou comporter multitude de petits vides. Ainsi, la qualité du béton est amoindrie. Donc il faut augmenter le volume apparent des sables pour compenser le foisonnement.

Un sable plus fin foisonne beaucoup plus et atteint sa valeur maximale de foisonnement pour une plus forte teneur en eau qu'un sable grossier, et un sable concassé foisonne beaucoup plus qu'un sable naturel.

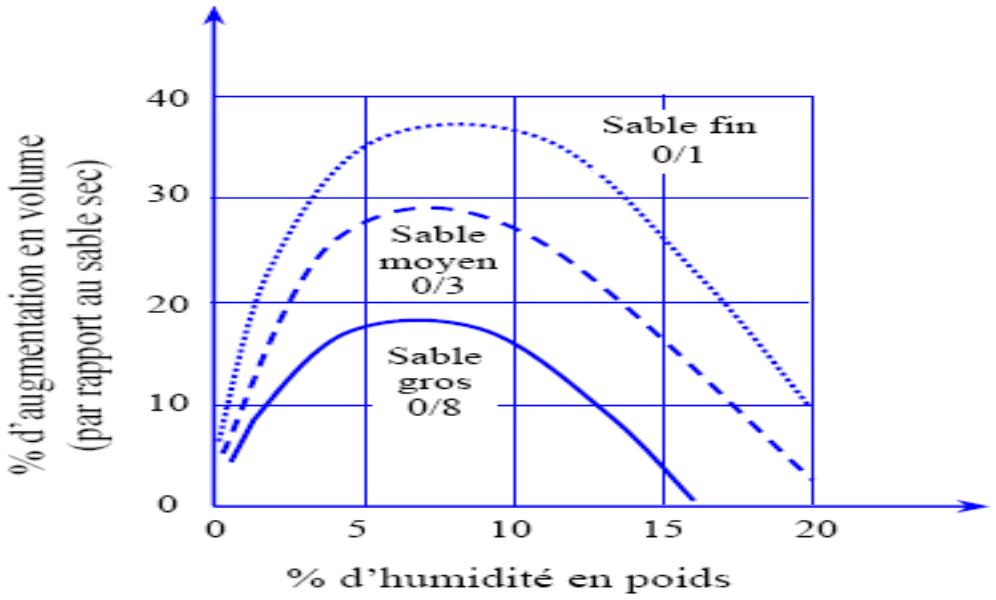


Figure II.3. Foisonnement du *sable* en fonction de la teneur en eau [93]

II.8. PROPRIETES THERMIQUES

Trois propriétés thermiques des sables sont importantes en ce qui concerne la performance du béton. Il s'agit du coefficient de dilatation thermique, de la chaleur spécifique et de la conductivité. Les deux dernières sont importantes pour les bétons de masse ou lorsqu'une isolation est requise, mais pas pour les bétons de structures ordinaires.

Le coefficient de dilatation thermique des sables influence la valeur du coefficient de dilatation thermique du béton renfermant ce granulat. Plus le coefficient de dilatation thermique du granulat est élevé, plus celui du béton le sera également, bien que ce dernier dépende de sa teneur en granulats et des proportions du mélange en général. [91]

II.9.CARACTERISATIONS DES SABLES

II.9.1.CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Tableau II.4. L'essai qui détermine la caractéristique mécanique

Caractéristiques	Norme de mode opératoire	But de l'essai	Domaine d'application
Friabilité des sables (FS)	P 18-576	Détermination de la résistance à l'usure des sables. En fonction des usages, les valeurs maximales tolérées vont de 40 à 60.	Sables pour certaines techniques routières

II.9.2.CARACTERISTIQUES PHYSIQUES:

Tableau II.5. Les essais qui déterminent les caractéristiques physiques

Caractéristiques	Norme de mode opératoire	But de l'essai	Domaine d'application
Absorption d'eau	NF EN 1097-6	Mesure de la capacité d'un granulat à absorber de l'eau. La valeur maximum acceptée en général est de 6%.	Béton – Sables et gravillons
Masse volumique réelle	NF EN 1097-6	La masse volumique réelle est obtenue en faisant le rapport de la masse sèche par le volume occupé par la matière solide. La valeur obtenue est seulement à déclarer	Sables et graviers
Qualification vis à vis de l'alcali réaction	FD P 18-542 XP P 18-594	La silice réactive contenue éventuellement dans un granulat peut quelquefois en présence d'eau et d'éléments alcalins (sodium, potassium) provoquer des phénomènes de gonflement destructif au sein des bétons. Les granulats sont qualifiés de non réactif (NR), de potentiellement réactif (PR) ou de potentiellement réactif à effet de pessimum (PRP). L'utilisateur tient compte de ces qualifications dans l'établissement de ses formulations.	Béton – Sables et gravillons

Tableau II.6. Les essais qui déterminent les caractéristiques de fabrications

Caractéristiques	Norme de mode opératoire	But de l'essai	Domaine d'application
Granulométrie	NF EN 933-1	Détermination de la distribution dimensionnelle (en mm) des grains à l'aide de tamis normalisés. Elle permet d'établirprécisément les compositions de bétons, degraves et d'enrobés bitumineux.	sables
Teneur en fines	NF EN 933-1	Détermination de la quantité de particulesinférieures à 63 microns. Cette caractéristique est dorénavant utiliséepour évaluer la propreté des gravillons (engénéral la teneur doit être inférieure à 1.5 % ouà 4 %).	sables
Equivalent de sable	NF EN 933-8	Evaluation de la quantité de fines nocives (particules inférieures à 63 microns) contenuedans un sable en vue de détecter la présenceéventuelles de fines argileuses. En général, la valeur obtenue doit êtresupérieure à 60 ou à 65.	sables
Valeur de bleu de méthylène	NF EN 933-9	Détermination directe de la quantité d'argile contenue dans les fines d'un sable ou d'ungravillon. En général, la valeur obtenue doit êtresupérieure à 1.5.	sables
Vitesse écoulement	NF EN 933-6	Détermination de l'angularité des sables. Plusla valeur obtenue est forte (> à 35 s), plus le sable contient d'éléments concassés anguleux.	Sable alluvionnaire concassé pourles techniquesroutières
Impuretésprohibées	XP P 18-545	Détermination (en %) de la masse de débrisvégétaux, particules de bois et autres résidus, contenus dans les granulats. Le seuil généralement requis est de 0.1 %	béton

II.9.4.CARACTERISTIQUES CHIMIQUES :

Tableau II.7. Les essais qui déterminent les caractéristiques chimiques

Caractéristiques	Norme de mode opératoire	But de l'essai	Domaine d'application
Teneur en sulfates solubles dansl'acide	NF EN1744-1, article 12	Détermination de la quantité de sulfatescontenus dans un granulat. Le résultat est exprimé en % de SO_3.En général, la valeur obtenue doit être inférieure à 0.2%	béton
Teneur en soufretotal	NF EN1744-1, article 11	Détermination de la quantité de soufre (quelque soit sa forme chimique) contenu dansun granulat. Le résultat est exprimé en % de S. En général, la valeur obtenue doit être inférieure à 1%	béton
Teneur enchlorures solublesdans l'eau	NF EN1744-1, articles 7, 8 ou 9	Détermination de la quantité d'ions chlorurescontenus dans un granulat. Le résultat estexprimé en % de Cl. La valeur est à déclarer si le résultat est supérieur à 0.01%	béton
Teneur en alcalinsactifs solublesdans l'eau dechaux	LPC n° 37	Détermination de la quantité d'alcalins (ionssodium et potassium) contenus dans ungranulat. Le résultat est exprimé en % de Na_20équivalent. La valeur obtenue est seulement à déclarer.	béton
Polluantsorganiques	NF EN1744-1, article 15	Recherche de la présence de polluants organiques pouvant affecter la prise des liants hydrauliques. Aucune présence de polluants n'est généralement admise.	Sable pour béton

II.10. LES DIFFERENTS TYPES DE SABLE

II.10.1.SABLE NORMALISE

Le sable normalisé est un sable naturel, siliceux, le plus quartzeux possible en particulier dans sa partie fine, propre, à grains arrondis et sèche. La courbe granulométrique déterminée par tamisage doit se trouver à l'intérieur du fuseau défini par les deux courbes limites du graphe (Voir Fig II.4.), ou par le tableau II.8 ci-dessous. Les sables sont divisés en au moins 4 fractions distinctes afin d'éviter les fractions de sable de composition granulaire trop étendue pouvant entraîner leur ségrégation. [90]



Figure. II.4.Sable NORMALISE

Tableau II.8. Répartition des classes granulaires du sable normalisé (selon N. A 523-1990) **[99]**

Tamis (mm)	Refus cumulés (%)	Fractionnement du sable
0.08	98±2	Fraction fine subdivisée en 02 fractions de masses égales
0.16	88±5	
0.5	67±5	
1.00	33±5	Fraction moyenne
1.60	5±5	Fraction grossière
2.00	0	

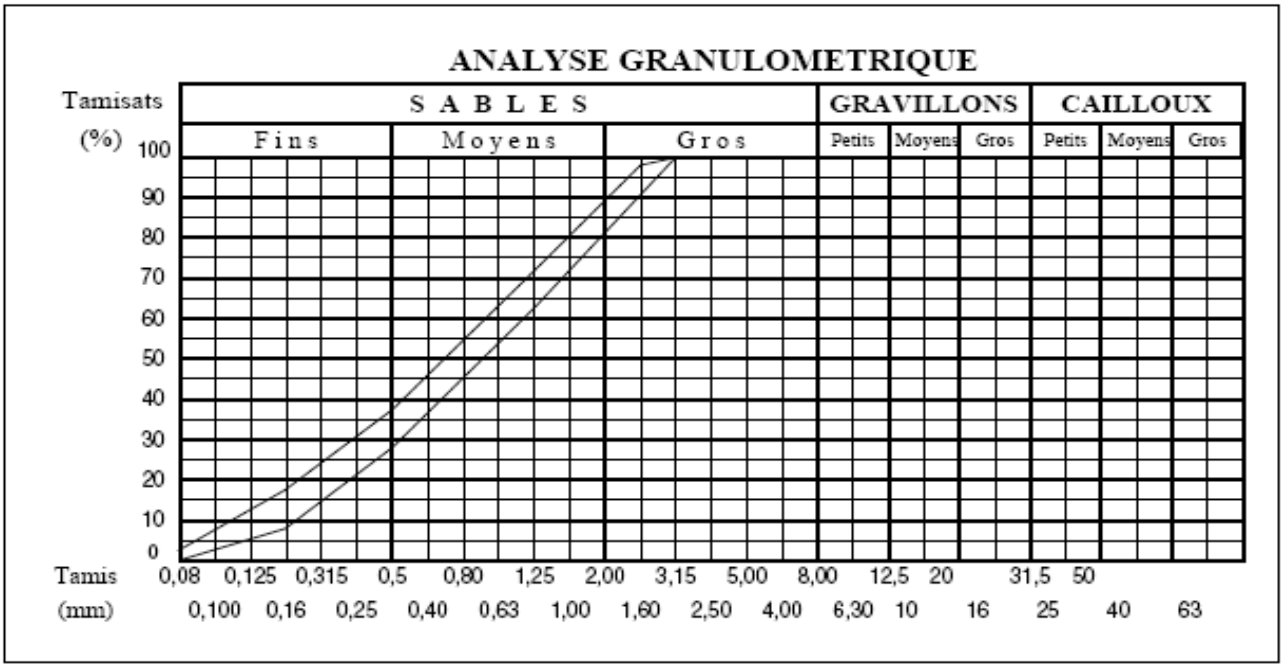


Figure II.5.Courbe granulométrique du sable normalisé
selon la norme (CEN EN 196-1) [93]

II.10.2.Sable de dunes

Les sables des dunes sont les formations détritiques les plus répandus dans le sud de l'Algérie, leur couleur est jaune orangée, ou rouge suivant leur degré d'altération occupent la majeure partie du sud Algérien (SAHARA).

Les sables dunaires ont des teneurs importantes en quartz supérieur à 90 % et ils ont également une fraction sableuse de fines dominantes. La Fig II.6, montre une vue générale du sable de dune [92].



Figure II.6. Sables des Dunes

** Localisation des sites*

Les sables des dunes présentés ici sont ceux utilisés par se situent :

- Sable de dunes de la région de Laghouat, Située à 400 km au Sud d'Alger.

- Sable de dunes de la région de Djelfa, Située à 300 km au Sud d'Alger.

- Sable de dunes de la région de Ghardaïa, Située à 600 km au Sud d'Alger. [92]

II.10.3. Sable de mer

Les sables de plage utilisés dans le domaine de la construction ont fait l'objet d'importants prélèvements et exploitation anarchique durant les dernières années, ce qui a engendré la dégradation et l'épuisement de plusieurs sablières causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages ce qui a fait apparaître deux décrets ministériels, approuvés en 1991 et 1999 par le ministère de l'équipement et du logement, interdisant l'exploitation de sable de mer et d'alluvions.



La Figure II.7 montre une vue sur le sable de mer [92]

**** Localisation des sites :***

Les sables de mer présentés sont les résultats des études établies par la S.E.T.A.M.

- Sable de mer de la région de Zéralda: Située à 40 km à l'ouest d'Alger
- Sable de mer de la région de Cherchell: Située à 100 km plus à l'ouest d'Alger
- Sable de mer de la région de Mostaganem: Située à 355 kmà l'ouest d'Alger. [92]

II.9.4.Sable d'oued

Les sables d'oued ont une fraction sableuse grossière nettement dominante ainsi qu'une fraction graveleuse.

Une vue générale sur la Fig II.8 montrant un type de sable d'oued



Figure II.8. Sable d'El Oued

**** Localisation des sites :*** Les sables d'oued étudiés se situent :

- Sable d'oued de la région de Baghlia: Située à 40 km à l'est d'Alger .
- Sable d'oued de la région de Boussaâda: Située à 100 km plus à l'est d'Alger
- Sable d'oued de la région de Si Mahdjoub : Située à 200 km plus au Sud
- Sable d'oued région de Chlef : Située à 208 km à l'ouest d'Alger
- Sable d'oued de la région de Bouira : Située à 122 km à l'Est d'Alger. [92]

II.9.5. SABLE DE CONCASSAGE

Le sable de concassage est un matériau obtenu à partir des roches massives après des opérations de concassage et de calibrage dans une carrière de production de gravillons.

En raison du pourcentage élevé de fins inférieures de 80 microns, allant jusqu'à 25%, ce sable ne peut être utilisé en l'état dans la confection des bétons, car il nécessite une demande excessive en eau de gâchage pour une mise en œuvre correcte du béton. Cet excès d'eau à pour conséquence de limiter les performances finales des bétons ainsi réalisés. Pour pouvoir utiliser le sable de concassage il est indispensable de le laver. [90]

Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières. Ils tendent de plus en plus à remplacer les sables ronds dans la fabrication des bétons. L'origine de se sable est la morphologie des grains qui est une notion qui renferme de nombreux paramètres : élongation, épaisseur, concavité, émoussé. Intuitivement, on peut sentir que les sables de concassage sont plus " anguleux " que les sables dits ronds. Cependant, la forme de ces sables ronds est assez éloignée de celle d'une sphère.



Figure. II.9.Sable de concassage

II.9.6.Correction des sables

L'Approvisionnement en sable pour la confection du béton pose des fois le problème de la finesse, la rareté et la capacité de production de ce dernier. A cet effet on est contraint d'utiliser un sable corrigé par un autre. La correction des sables s'effectue à travers la correction du module de finesse.

La méthode de correction de ces dernières adoptées est celle d'ABRAMS. Cette méthode est basée sur le choix du module de finesse du mélange à réaliser , elle consiste à déterminer les taux des sables (sable fin et sable gros) pour obtenir un sable corrigé et cela en utilisant les formules suivantes :

$$S_1 = M_{f1} - M_f \qquad \text{(II.6)}$$

$$S_2 = M_f - M_{f2} \qquad \text{(II.7)}$$

$$S = S_1 + S_2 \qquad \text{(II.8)}$$

Avec: M_{f1} : est le module de finesse du sable gros

M_{f2} : est le module de finesse du sable fin

M_f : est le module de finesse du sable désiré

Proportion du gros sable est : $\frac{S2}{S}$

Proportion du sable fin est : $\frac{S1}{S}$

Nous allons prendre à titre d'exemple la correction d'un sable gros de module de finesse MF=3.98 (Sable de Baghlia) par un sable fin de module de finesse MF = 1.75 (Sable de Bahbah) et on obtient un sable corrigé de module de finesse MF = 2.58.

Cette correction du sable a été effectuée par le laboratoire de la S.E.T.A.M Médéa. [92]

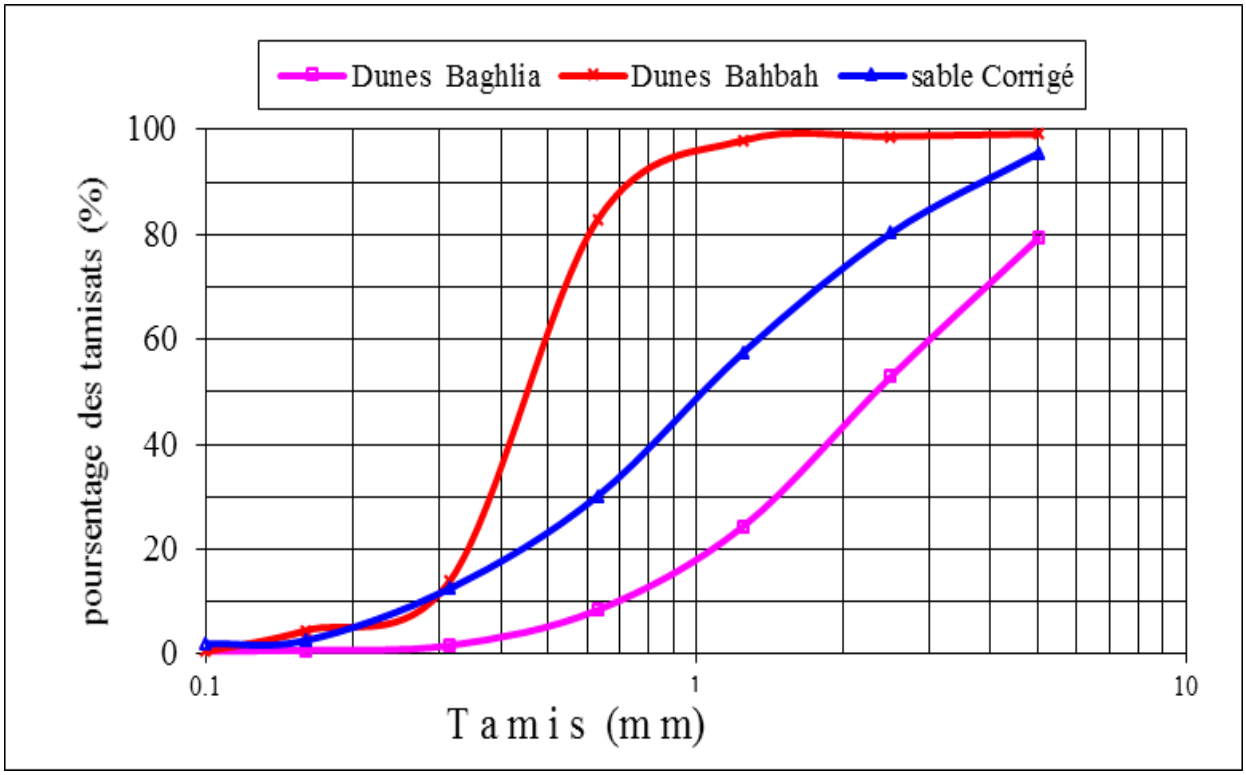


Figure II.10: Courbes granulométriques des sables (Sable Baghlia, Sable de Dune Bahbah et Sable Corrigé)

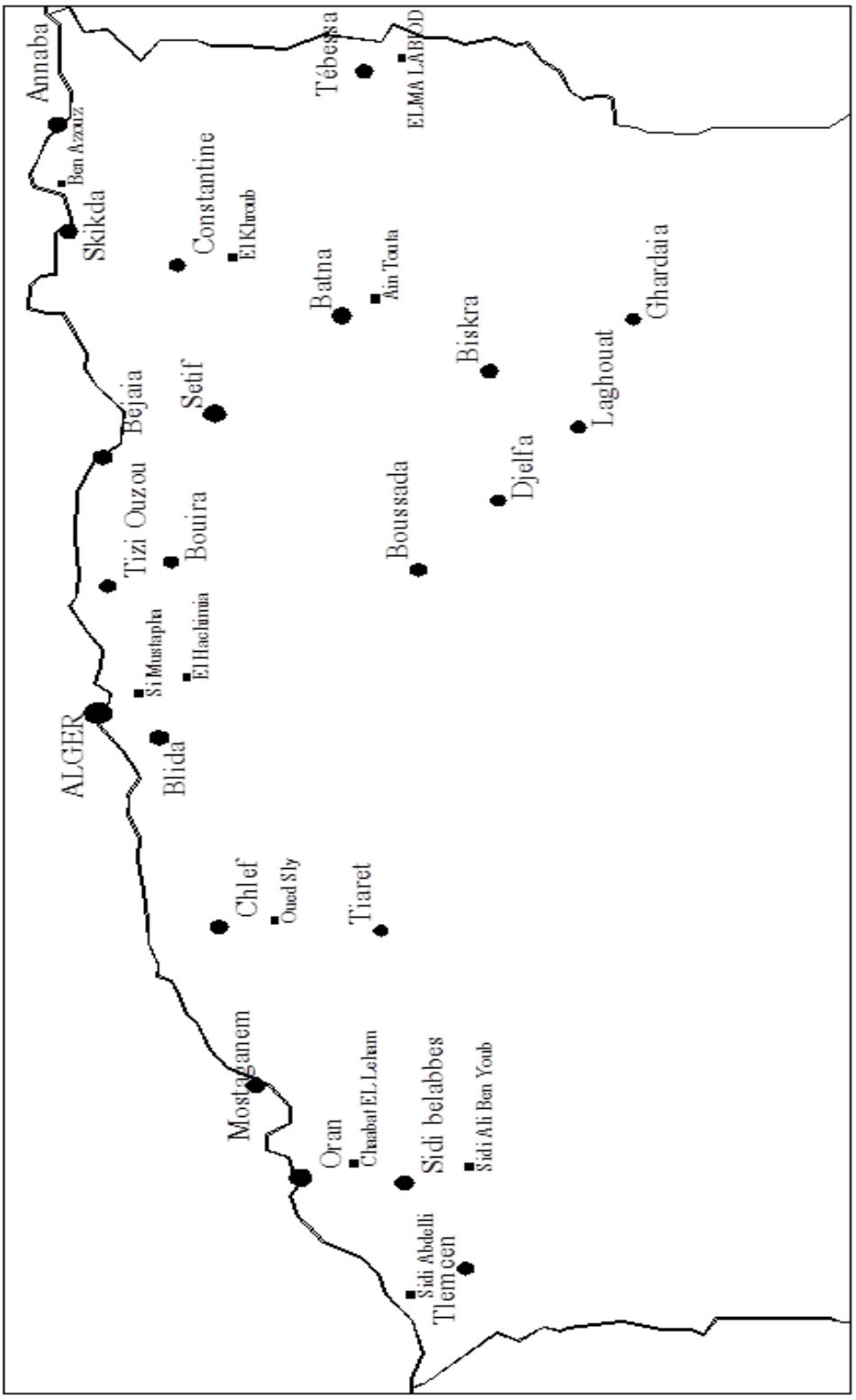


Figure II.11 localisation des sites

II.11. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de comprendre que le sable est un élément naturel qui se forme des grains de quartz, de mica, de feldspath et de magnétite sous l'effet des vents et des eaux. Et généralement les sables sont de nature siliceuse (le taux de la silice est plus élevé que les autres éléments chimiques). Il est classé selon son origine, sa provenance, sa dimension et sa densité.

Les propriétés : mécaniques, physico-chimiques et thermiques des sables permettent de le considérer comme un constituant de base qui a une influence considérable sur les caractéristiques des matériaux (mortier, béton) à court et à long terme. Et parmi ces caractéristiques on site : la dureté des grains, la dimension, la forme, la densité, la propreté, la porosité, la perméabilité et le degré d'absorption d'eau.

L'analyse bibliographique nous a permis d'avoir une idée sur les sables les plus disponibles et qui entrent dans la confection des matériaux de construction dans notre pays (sable de dune, sable de mer, sable d'oued, le sable de concassage et un sable de référence qui est le sable normalisé.

III.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux de notre étude et les techniques expérimentales utilisées. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des mortiers. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des mortiers. Ensuite, on présente les essais réalisés au cours de notre investigation sur les mortiers.

III.2. Matériaux utilisées

III.2.1. Le ciment

On a utilisé un seul type de ciment au cours de cette étude expérimentale qui est le Ciment El Mâtine : c'est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 qui provient de cimenterie de LAFARGE (figure III.1) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] [100]. L'Analyse chimique et composition de ciment ainsi les caractéristiques physiques sont présentées aux tableaux III.1 et III.2 suivants, selon la fiche technique du ciment (Annexes A).

Tableau III.1. L'Analyse chimique et composition du ciment El Mâtine

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

Tableau III.2 : Essai physiques sur ciment

Essais	Norme
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1000
Expansion (mm)	0.50 – 2.50
Début de prise (min)	120 – 180
Fin de prise (min)	210-280



Figure III.1. ciment portland compose " matine "

III.2.2.Les Sables

Les sables analysés sont des sables locaux disponibles en Algérie : Sable Normalisé, Sable de Hassi Bahbah, Sable de Boughezoul, Sable de Sidi Bayazid et Sable de Concassage en provenance de la Sabliére Mont Guorno., dont les propriétés physiques d'identification sont présentées au tableau III.3. La figure III.2 suivante donne un aperçu sur la nature des sables utilisés



Figure III.2 les différents sable utilisés

III.2.2.1. Le sable normalisé

Le sable utilisé est un sable normalisé CEN de LEUCATE [101] conforme à la norme EN196-1 [99], ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 ± 5g, sa courbe granulométrique se situe à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure III.3, et son module de finesse moyen est égal à 2,32.



Figure III.3. Sable normalisé

III.2.2.2. Le sable Roulé

Les sables roulés utilisés dans cette étude sont :

- Sable de Hassi Bahbah, située à 190 Km de Médéa, sa classe granulaire est 0/0,315, c'est un sable très fin (figure III.4) son module de finesse est égal à 0.86.



Figure. III.4.Sable de Hassi Bahbah

- sable de Sidi Bayazid de la région de Djelfa, située à 240 Km au sud de Médéa, avec une classe granulaire de 0/0,315. C'est un sable fin à un module de finesse de 1.63 (figure III.5)



Figure III.5. Sable de Sidi Bayazid

III.2.2.3. Le sable de concassage

On a utilisé un sable de concassage de dimension 0/3 (figure III.6), provenant de la station de concassage de MONT GORNO situé à 25 Km au sud de Médéa [102]. Son module de finesse moyen est égal à 3.47. (Figure III.6)



Figure III.6 Sable de MONT GORNO

III.2.2.4 .sable de dune

Le sable utilisé c'est un sable de Boughezoul (sables siliceux) situé à 120 Km au sud de Médéa, sa classe granulaire est 0/0,315 (figure.III.7) et son module de finesse moyen est égal à 1.57.



Figure III.7 Sable de Boughezoul

Tableau III.3. Propriétés physiques d'identification des sables utilisés

Caractéristiques	Type de sable					Normes
Provenance	**Normalisé**	**Sidi bayazid**	**Boughzoul**	**Hassi Bahbah**	**Mont Guorno**	
Classe granulaire	0/3	0/3	0/3	0/3	0/5	NF EN 933-1 [103]
Module de finesse	2.32	1.63	1.57	0.86	3.47	
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.61	2.53	0.03	2.63	2.70	NF EN 1097-6 [104]
Equivalent de sable (%)	29.24	87.33	60.81	84.73	92.24	NF EN 933-8 [105]
Taux d'absorption d'eau (%)	0.24	0.99	0.78	0.92	0.36	NF EN 1097-6 [104]

III.2.3. L'eau de Gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire. Sa température est comprise entre 10 et 22°C.

III.2.4. Adjuvant

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité qui sont nécessaires à l'obtention d'un béton autoplaçant. Un seul type d'adjuvant a été utilisé durant notre étude, un superplastifiant MEDAFLOW 145, c'est un haut réducteur d'eau de la troisième génération, sous forme de liquide et d'une couleur jaunâtre, et conçu à base de poly carboxylates. Il est formulé a partir d'une nouvelle molécule de très haute performance, son utilisation exceptionnel de l'ouvrabilité (>2h30). MEDAFLOW 145 permet de diminuer le rapport eau/ciment (E/C) tout en améliorant considérablement la fluidité du béton. Il permet aussi d'augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme. La plage de dosage recommandée du MEDAFLOW 145 est de 0.6 à 2 %. Toutefois, le dosage optimal doit être recherché selon le type de mortier et les propriétés recherchées par la réalisation des gâchés au laboratoire. (Figure III.8), selon la fiche technique du superplastifiant Medaflow 145 (Annexes B).



Figure III.8 le superplastifiant MEDAFLOW 145

Ses caractéristiques sont :

- Aspect ……. Liquide
- Couleur ……... brai clair
- pH …… 5 – 6
- Densité …… 1.06 ± 0.02
- Teneur en chlore …… < 0.1 g/l

III.5. Formulation des mortiers autoplaçants

Notre étude est focalisée sur l'influence de la nature du sable et du dosage en superplastifiant sur la formulation d'un mortier autoplaçant. Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA, (voir Annexes C) avec quelques modifications apportées au niveau de la détermination de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/ciment (E/C) ainsi que le rapport superplastifiant/ciment (S_P/C)et ceci dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du mortier à l'état frais. BOUKENDAKDJI [106], dans ses travaux de recherche a ajusté le rapport S/M (S/M=0.5) et SP/C de manière à avoir un diamètre d'étalement de la galette du mortier compris entre 270 et 330 mm et un temps d'écoulement à l'entonnoir en V compris entre 2 et 10 s.

Afin de minimiser le nombre de variables pour le mortier autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/C. Dans notre étude, nous nous sommes basés sur les travaux de BOUKENDAKDJI [106]. Le rapport E/C a été fixé à 0,4 avec une modification apportée au niveau de la détermination de la teneur en sable dans le mortier (S/M = 0.45).

En ce qui concerne l'optimisation du dosage en superplastifiant avec la nature du sable utilisé, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement de la galette et le temps d'écoulement du mortier au V- funnel en fonction de la variation de la teneur en superplastifiant de 0.6 à 2% à l'état frais. Nous suivons ensuite les résistances mécaniques à l'état durci des différents mortiers autoplaçant fabriqués.

III.6. Malaxage du mortier

Pour la confection du mortier, nous avons utilisé un malaxeur de 5 litres de capacité (Figure III.9). La séquence de malaxage du mortier est la suivante :

Malaxer à sec les matériaux (le sable et le ciment) pendant environ une 30 seconde dans le but d'homogénéiser le mélange ; Ajouter la première quantité d'eau (E_1=70 % de la quantité totale d'eau de gâchage) et malaxer pendant une minute ; Ajouter par la suite la deuxième quantité d'eau (E_2= 30% de la quantité totale d'eau de gâchage) mélangée avec le superplastifiant et malaxer pendant une autre minute. En fin, malaxer le tout pendant trois minutes. La séquence du malaxage est présentée sur la figure III.10 suivante.



Figure III.9. Malaxeur à mortier

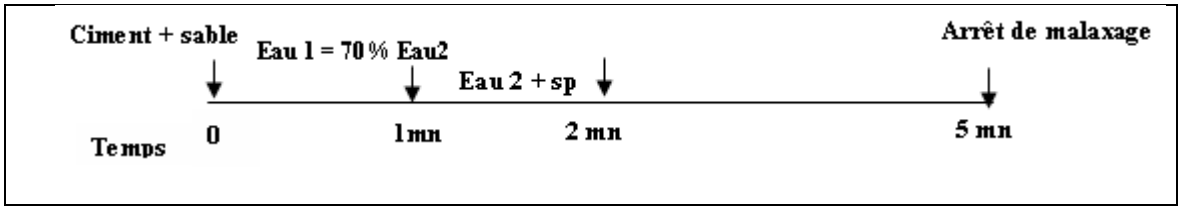


Figure III.10. Séquence de malaxage du mortier

III.7. Méthodes d'essais

***Lavage du sable de concassage**:

Le lavage du sable doit se faire afin d'obtenir un constituant propre, exempte d'éléments nocifs et de fines. Le lavage est effectué sous l'eau de robinet en procédant au tamisage de sable avec un tamis de maille égale à 0.063 mm [96].

III.7.1. Les Essais

III.7.1.1. Essais sur les sables

a- Masse volumique absolue

Cet essai (figure III.11) consiste à mettre dans une éprouvette un volume d'eau de 200 ml puis on verse 100 g du matériau dedans étape le biais de l'équation suivante on calcul la masse volumique absolue [96] (voir Annexes D)

$$\rho_{abs} = M / V\,2\text{-}V\,1 \quad (kg/\,m\,3) \qquad (III.1)$$

À la fin, on peut tirer les indices suivants: (porosité, compacité, indice des vides).

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} \qquad (III.2)$$

$$P = 1 - C \qquad (III.3)$$

$$I = P / C \qquad (III.4)$$

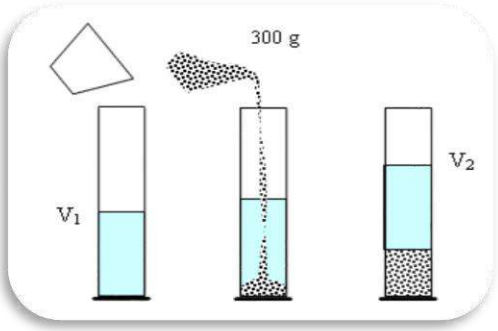


Figure III.11. Les éprouvettes de mesure

b- Equivalent de sable

Selon la norme NA.455/1990 [96], la procédure de mesure de l'équivalent de sable est comme suit [107]:

* On dispose de trois éprouvettes propres pour chaque sable, puis on prendra la moyenne des trois résultats obtenus ;

* En versant une quantité de 120 g de sable, jusqu'au premier trait d'une éprouvette normalisée contenant une solution lavant, et on laisse à reposer 10 minutes.

* On bouche les éprouvettes et on les agite d'une manière automatique à l'aide d'une machine agitatrice pendant 30 secondes ;

* On lave et on remplit les éprouvettes par la solution lavant jusqu'au trait supérieur, et les laisse à reposer 20 minutes en évitant toute vibration ; On lit les hauteurs h_1 et h_2 puis à l'aide d'un piston on mesure h_2'. (voir Annexes D)

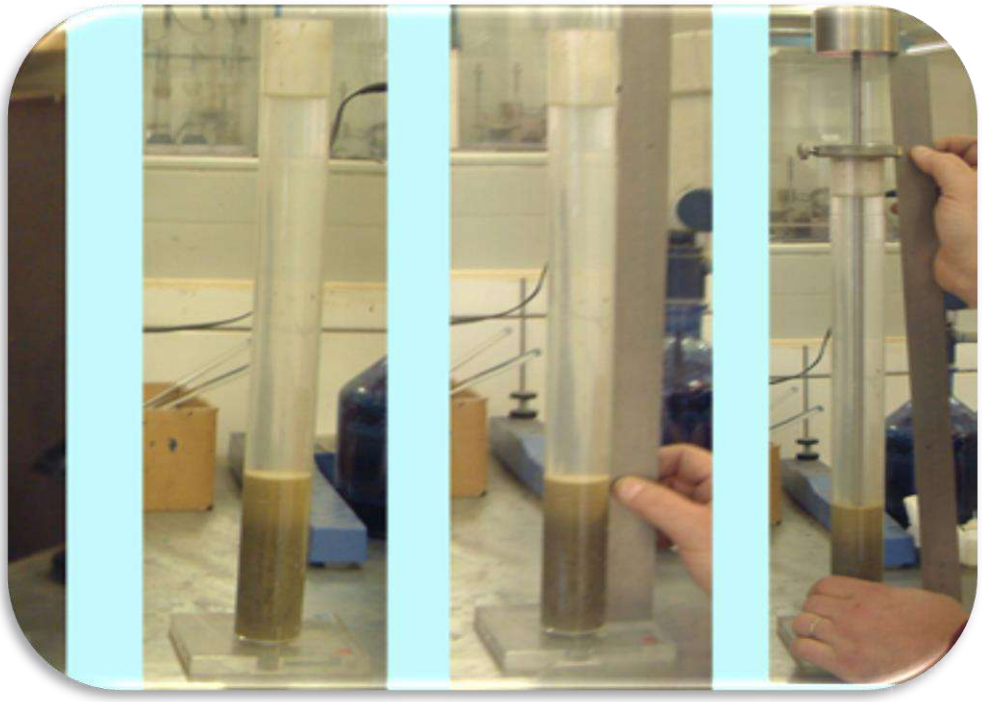


Figure III.12. Procédure de mesure de l'équivalent de sable

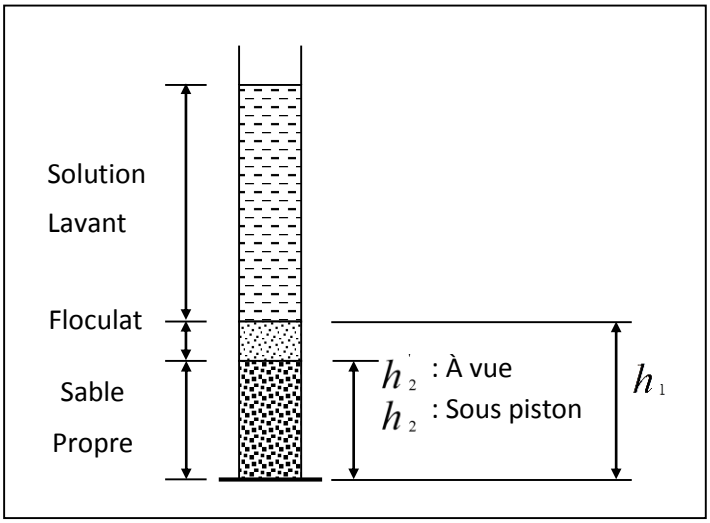


Figure III.13. Les différents repères de l'essai d'équivalent de sable

c- Taux d'absorption des granulats

Après déshydratation des échantillons à 105°C, on les pose dans un bac d'eau jusqu'à la saturation, et on mesure ensuite le taux d'absorption des granulats par la formule suivante :

$$AG(\%) = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) * 100 \qquad \text{(III.5)}$$

Avec : M1: Poids de l'échantillon déshydraté

M2: Poids de l'échantillon après saturation

d-Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme Algérienne NA 2607-1990 [95] .où le sable passant à travers une série de maille décroissante (figure III.14) dont on pèse le refus de chaque tamis [107].

On utilise une quantité de 1000 g pour le sable de concassage et 1400 g pour le sable roulé. On trace les courbes granulométriques pour chaque sable, puis on tire les coefficients suivants :

* Le coefficient d'uniformité Cu
* Le coefficient de courbure Cc
* Le module de finesse MF



Figure III.14. Séries de tamis

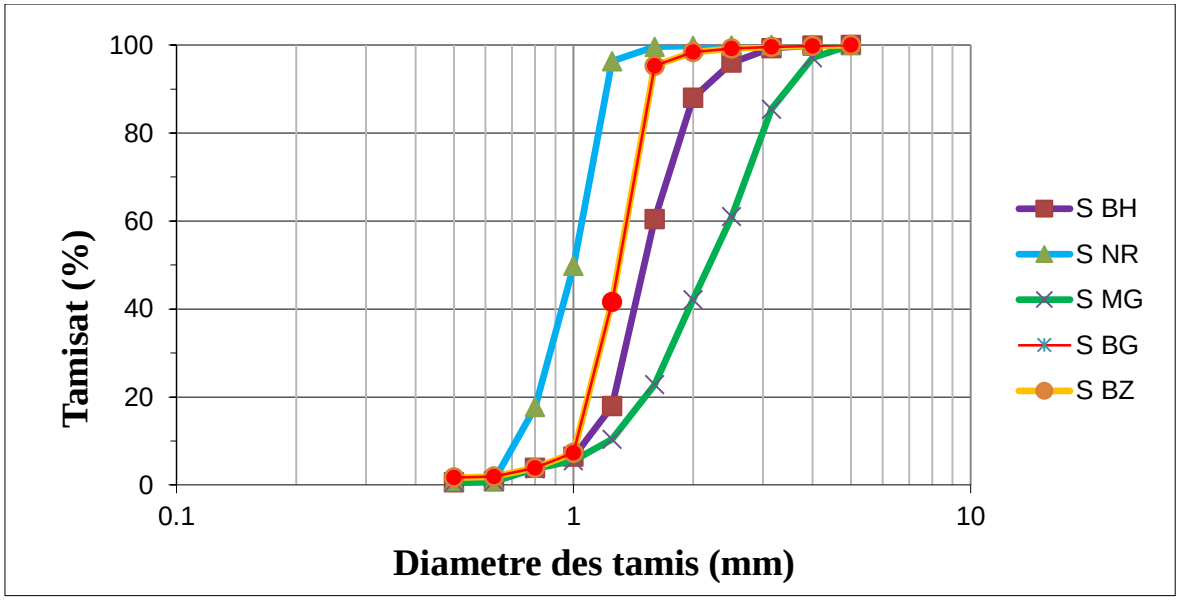


Figure III.15 Granulométrie de déférant sable utilisé

III.7.1.2 Essais effectués sur mortier

III.7.1.2.1. A l'état frais

A. Essais d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure III.16 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

A.1. Matériel nécessaire

* Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté ;

* Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur ;

* Mètre ou réglet de 90cm

A.2. Mode opératoire

* Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;

* Placer et centrer le cône d'Abrams sur la plaque ;

* Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône;

* Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;

* Une fois que le mortier s'est étalé sur la plaque, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues.

* Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de mortier (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).



Figure III.16 : Essai d'étalement du mortier

B. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé 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 mesuré. Ce temps mesuré 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 (Figure III.17).

B.1 Matériel nécessaire

* Entonnoir en V (V-funnel)

* Chronomètre ;

* Un seau de capacité de 12 litres.

B.2 Mode opératoire

* Placer le V-funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé ;

* Prélever dans un seau un échantillon de mortier représentatif d'environ de 12 litres ;

* Remplir l'entonnoir avec le mortier ;

* Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet ;

* Remplir l'entonnoir une deuxième fois de béton ;

* Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir ;

* Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en déclenchant le chronomètre ;

* Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement TVF;

* Refaire l'essai 3 fois ;

* Le résultat est la moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.



Figure III.17. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) pour mortier

III.7.1.2.2. A l'état durci

Les essais de résistance mécanique de tous les mortiers étudiés ont été effectués sur des éprouvettes de forme prismatique de dimensions (4x4x16) cm^3. Pour chaque gâchée trois prismes ont été confectionnés (figure III.18). Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans un bac remplit d'eau à une température de 20 C° jusqu'au moment des essais. Vue la période limitée pour la réalisation de ce mémoire, les résistances mécaniques ont été déterminées juste à l'âge de 7 jours.



Figure III.18. Confection des éprouvettes

A. Essai de traction

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme [EN 196-1] [99]. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Figure III.19), une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L [108].

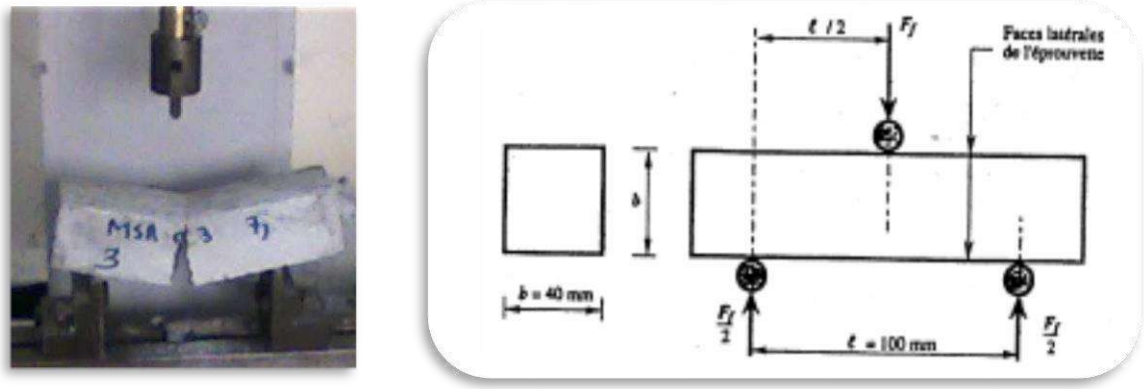


Figure III.19. Essai de traction par flexion

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v \qquad \text{(III.6)}$$

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

$$M = \frac{F_f L}{4} \qquad \text{(III.7)}$$

I : Moment d'inertie de la section transversale :

$$I = \frac{a^4}{12} \qquad \text{(III.8)}$$

v : La distance de la fibre inférieure la plus éloignée :

$$v = \frac{a}{2} \qquad \text{(III.9)}$$

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{a^3} \qquad \text{(III.10)}$$



Figure III.20. Machine d'essai à la flexion par traction

B. Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] [99] par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques après rompre en flexion à l'âge de 7 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN (figure III.22). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de six (06) demi-prismes des trois éprouvettes.

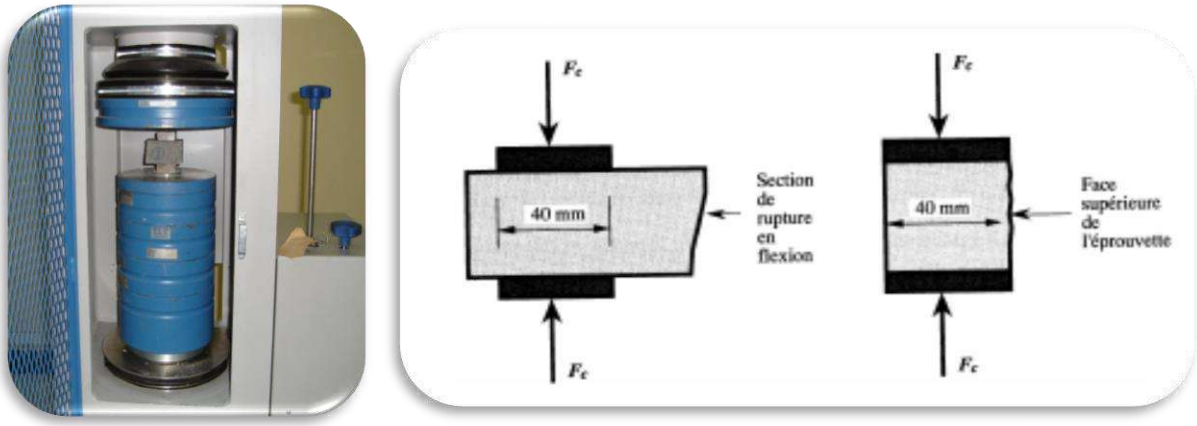


Figure III.21. Essai de compression

Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{a^2} \qquad \text{(III.11)}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$f_{c28}\,(\text{MPa}) = \frac{F_c\,(\text{N})}{1600} \qquad \text{(III.12)}$$

Essais sur béton à l'état frais

Le diagramme suivant (Figure III.22) résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais.

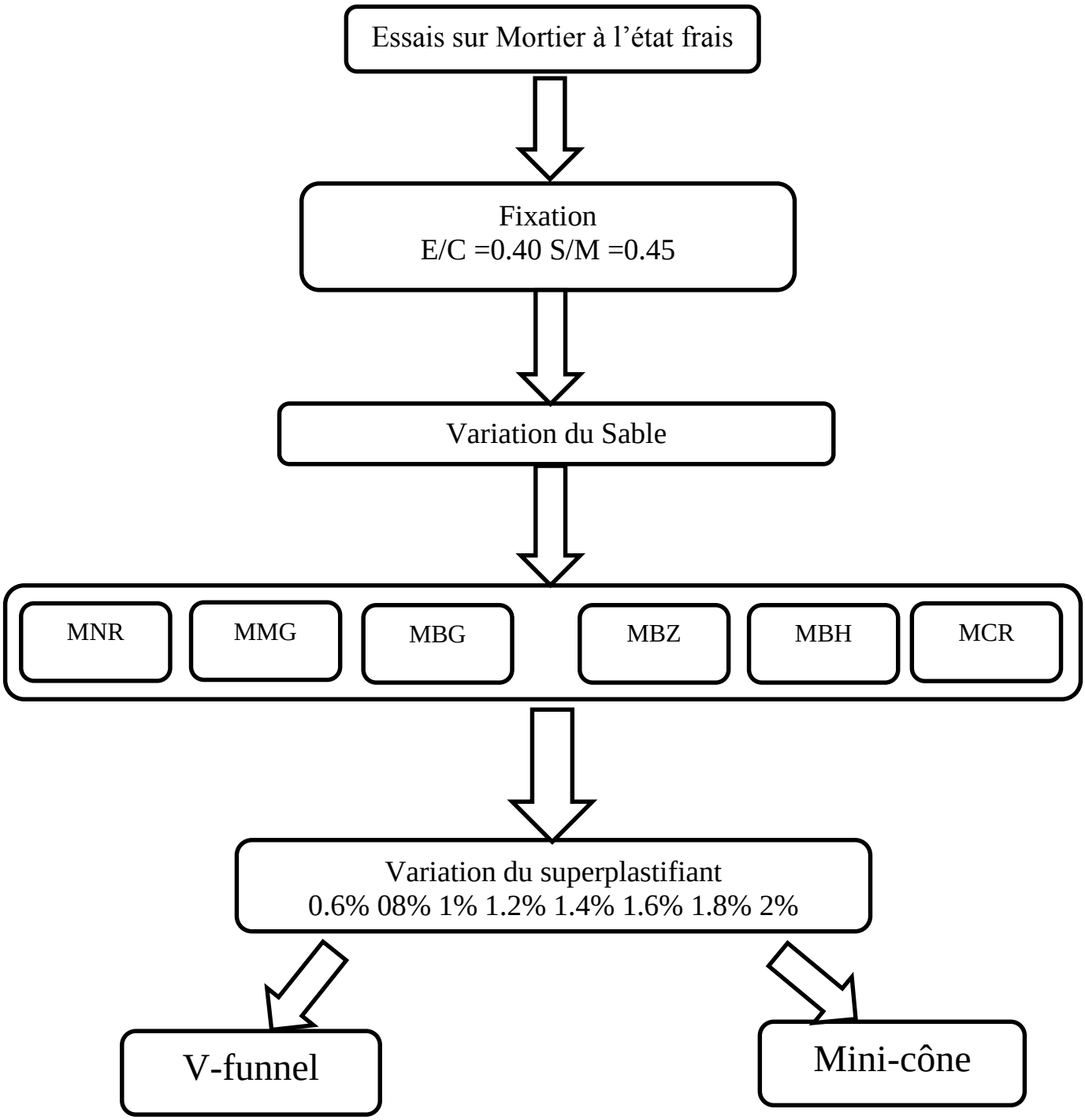


Figure III.22.diagramme des essais réalisés sur mortier

Essais sur béton à l'état durci

Le diagramme suivant (Figure III.23) résume les essais réalisés sur le béton à l'état durci.

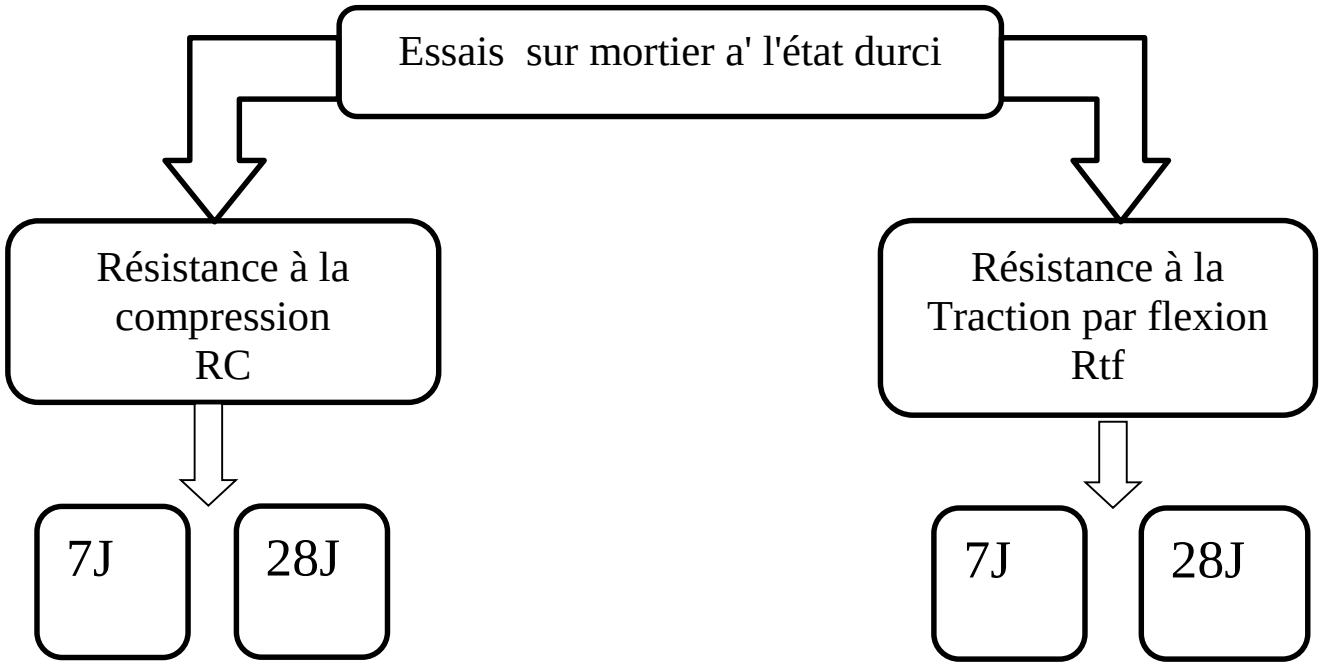


Figure III.23 : diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci.

III.8. CONCLUSION

Dans notre travail, des matériaux locaux disponibles dans les marchés de la wilaya (Médéa) sont utilisés pour la préparation des mortiers autoplaçant. Notre objectif est la production d'un mortier autoplaçant économique et écologique. Afin d'atteindre ce but, on a procède à formuler plusieurs MAP, en faisant varier le sable et le dosage en superplastifiant. L'effet de ces deux variables a été étudié à travers l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V. Des essais sont menés ensuite pour étudier les propriétés mécaniques de ces différents mortiers par l'essai de traction par flexion et l'essai de compression.

IV.1 INTRODUCTION

L'étude expérimentale a pour objet, d'étudier l'effet de la nature et du type de sable sur l'ouvrabilité et les résistances d'un mortier autoplaçant.

A cet effet, nous visons à tester les différents mortiers réalisés par l'essai d'étalement au mini cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V – Funnel) à l'état frais. Ainsi nous étudions la caractérisation des différents mortiers à l'état durci à travers l'essai de traction par flexion et l'essai de compression. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude sont présentés et discutés ci-après.

IV.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX A L'ETAT FRAIS

IV.2.1 Sable normalisé

Les résultats du diamètre d'étalement au mini cône et le temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel pour l'ensemble des mortiers à base de sable normalisé, sont présentés dans le tableau IV.1 suivant : (Voir Annexe E)

Tableau IV.1. Composition et Résultats des mortiers à base du sable normalisé

Mortier	**MNR 1**	**MNR 2**	**MNR 3**	**MNR 4**	**MNR 5**	**MNR 6**	**MNR 7**	**MNR 8**
Ciment (g)	997							
Sable (g)	1528							
Eau (g)	399							
Sp %	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
D_{moy} (mm)	265	266	273	270	290	297	303	308
T d'écoulement (sec)	3.34	3	2.32	3.12	3.29	2.32	2.69	2.33
Remarque	Homog ène	Homog ène	Homog ène	Homog ène	Homog ène	Homog ène	Homog ène	Homog ène

Sur les figures IV.1 et IV.2 suivantes, nous présentons la variation du diamètre d'étalement au mini cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base de sable normalisé.

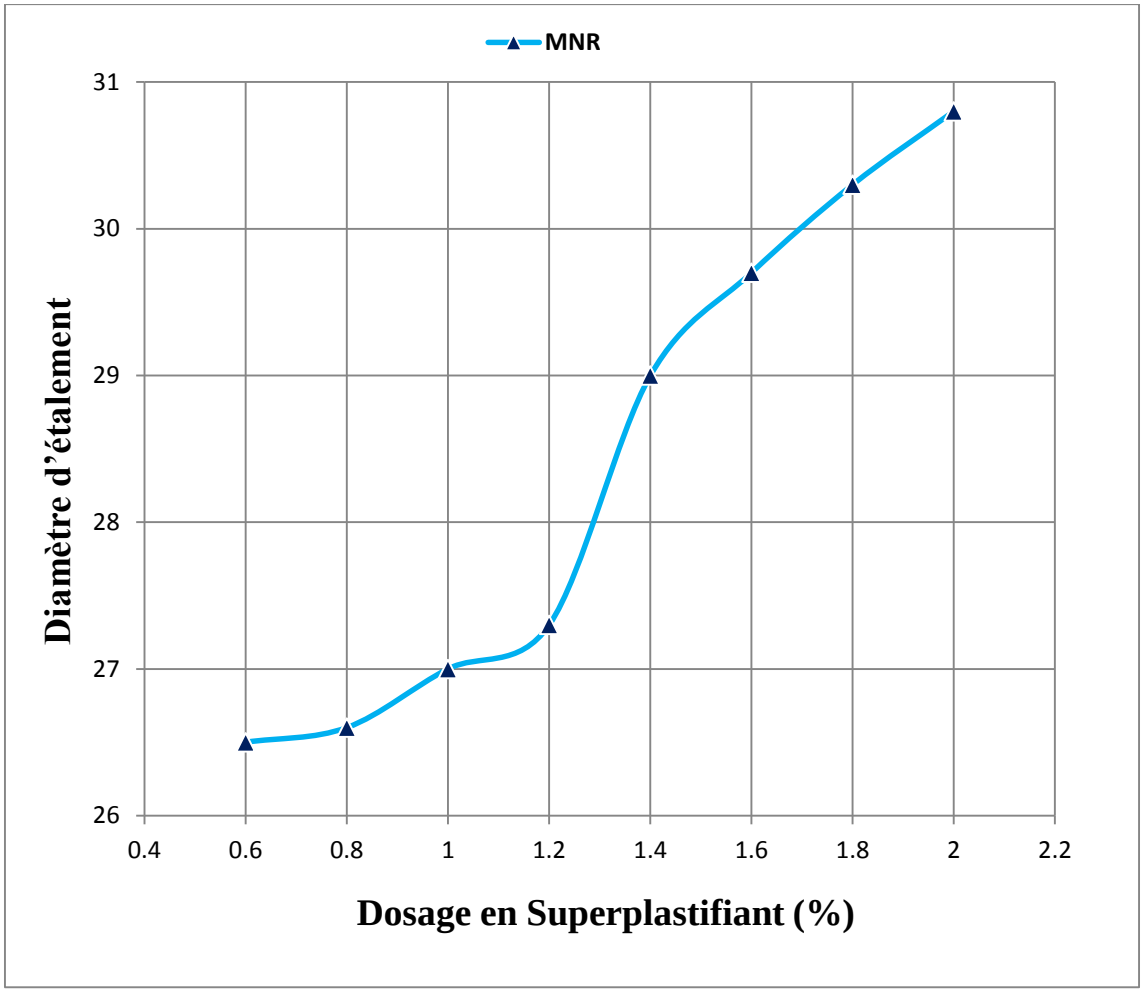


Figure IV.1. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé

A partir des figures IV.1 ci-dessus, nous remarquons que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant pour tous les mortiers à base de sable normalisé. Cet étalement augmente avec une pente considérable entre 1.2 et 1.4 % du dosage puis cette pente diminue ce qui prouve que ce dernier (1.4 %) est le pourcentage optimum.

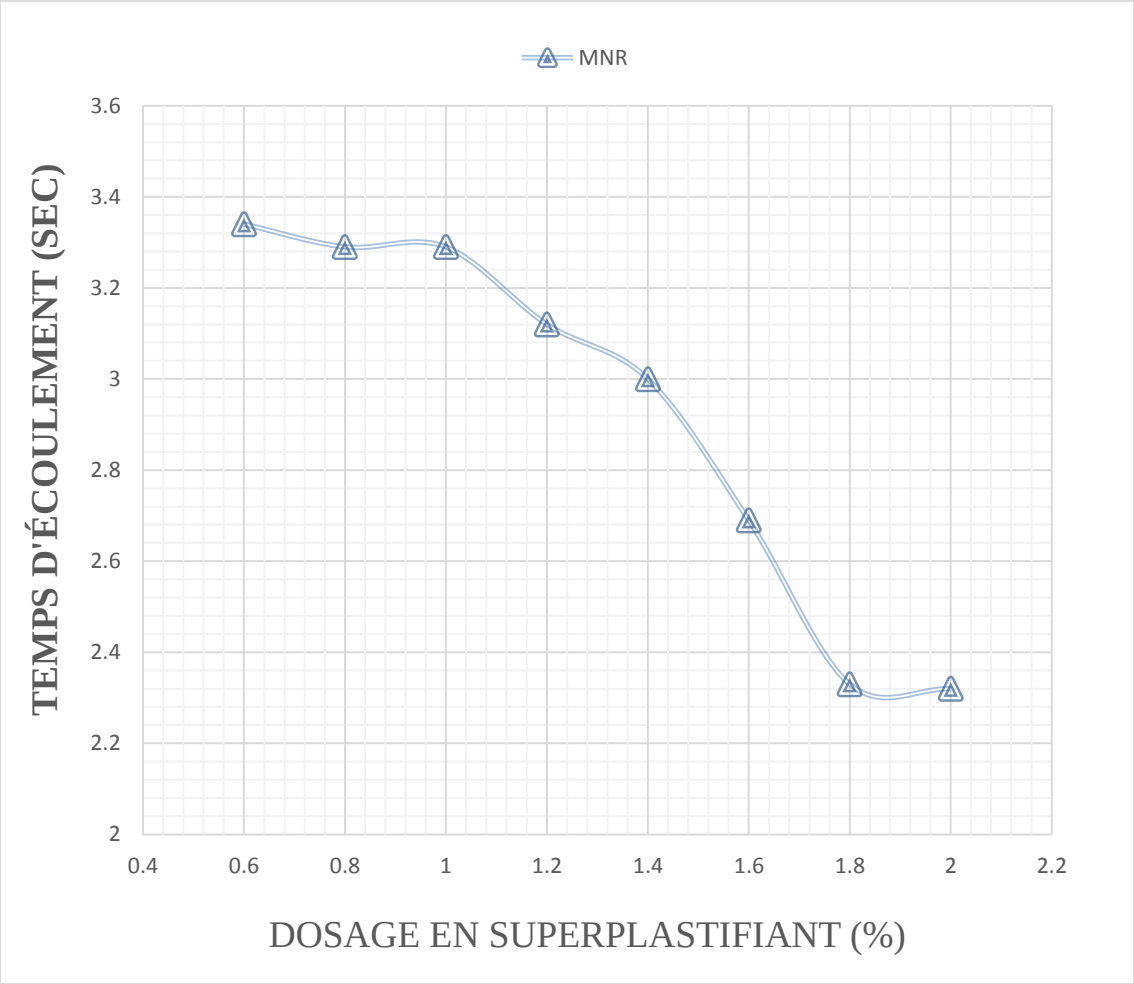


Figure IV.2. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé

La figure IV.2 montre une diminution du temps d'écoulement avec l'augmentation du dosage en superplastifiant pour tous les mortiers à base de sable normalisé.

Au début, lorsque le dosage était compris entre 0.6 et 1.2 % nous avons constaté une petite diminution du temps d'écoulement causée par une grande influence du superplastifiant. Entre 1.2 % du dosage et 1.4 % la pente a diminué parce que l'influence du superplastifiant a elle aussi diminué. Enfin nous avons remarqué une stagnation du temps d'écoulement à partir de 1.8 % du dosage, ce qui nous permet de dire que ce pourcentage représente celui du degré de saturation.

IV.2.2. Sable concassé (Mont Gorno)

Les résultats du diamètre d'étalement au mini cône et le temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel pour l'ensemble des mortiers à base du sable concassé, sont présentés dans le tableau IV.2 suivant : (Voir Annexe E)

Tableau IV.2. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable Mont Gorno

Mortier	**MMG 1**	**MMG 2**	**MMG 3**	**MMG 4**	**MMG 5**	**MMG 6**	**MMG 7**	**MMG 8**
Ciment(g)	997							
Sable (g)	1575							
Eau (g)	399							
Sp %	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
D_{moy} (mm)	246	294	305	319	320	/	/	/
Temps d'écoulement (sec)	4.4	3.6	5.93	6.08	6.29	/	/	/
Remarque	Homogène	Homogène	Homogène	Ressuage	Ressuage ségrégation	/	/	/

Nous présentons sur les figures IV.3 et IV.4 suivantes, la variation du diamètre d'étalement au mini cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable Mont Gorno

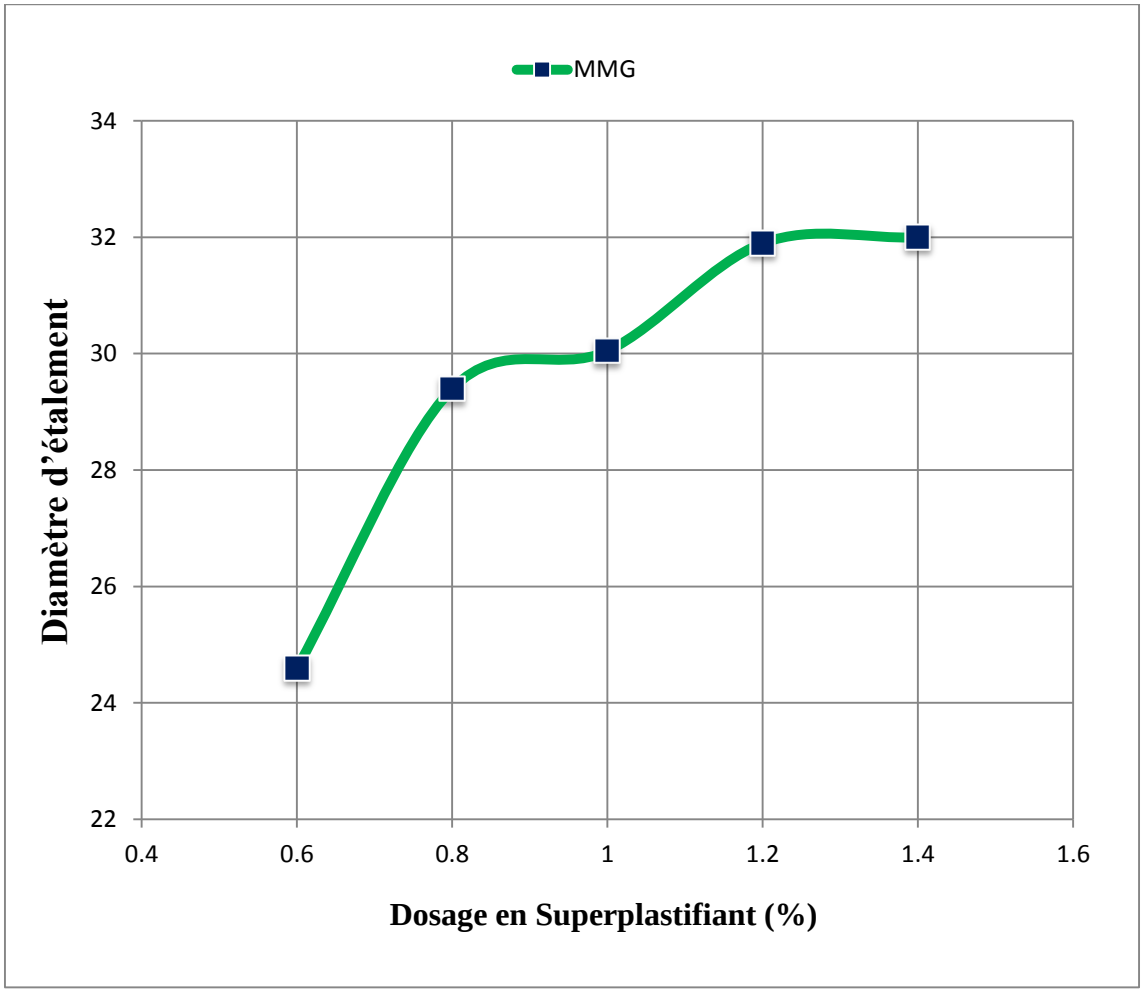


Figure IV.3. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base de sable Mont Gorno

La figure IV.3 démontre que lorsque le dosage en superplastifiant est compris entre 0.6 et 0.8 % la pente d'étalement est exemplaire. Cette pente devient constante entre 0.8 et 1 % du dosage, cette dernière valeur est par conséquence le pourcentage optimum. Par contre, à 1.2 % du dosage en superplastifiant nous avons trouvé une petite quantité de ressuage et à 1.4 % la valeur de l'étalement est hors du domaine cible et présente un grand ressuage et une grande ségrégation.

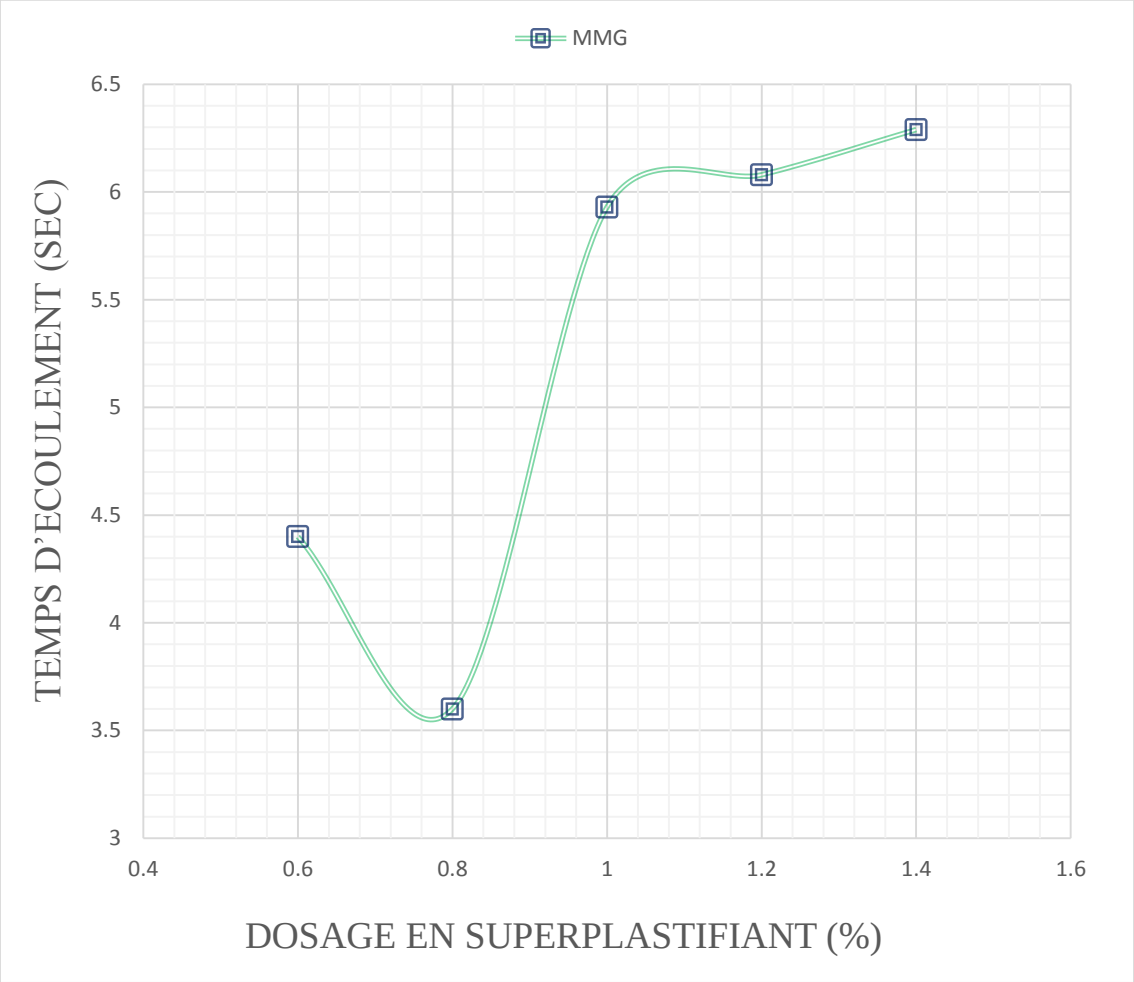


Figure IV.4. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable Mont Gorno

La figure IV.4 montre que le temps d'écoulement a diminué à partir du dosage en superplastifiant de 0.6 à 0.8 %. Nous remarquons par la suite que le temps d'écoulement augmente à partir de la valeur de 0.8 % du dosage dû au blocage du mortier.

IV.2.3. Sable de Sidi Bayazid

Le tableau IV.3 suivant, présente les résultats du diamètre d'étalement au mini cône et le temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid.

Tableau IV.3. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid

Mortier	**MBZ 1**	**MBZ 2**	**MBZ 3**	**MBZ 4**	**MBZ 5**	**MBZ 6**	**MBZ 7**	**MBZ 8**
Ciment(g)	997							
Sable (g)	1470							
Eau(g)	399							
Sp %	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
D_{moy} (mm)	244	258	291	331	330	333	/	/
Temps d'écoulement (sec)	5.10	4	3.8	3.02	3.25	3.40	/	/
Remarque	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène	Ressuage	Ressuage	/	/

Nous présentons sur les figures IV.5 et IV.6 suivantes, la variation du diamètre d'étalement au mini cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers de sable de Sidi Bayazid.

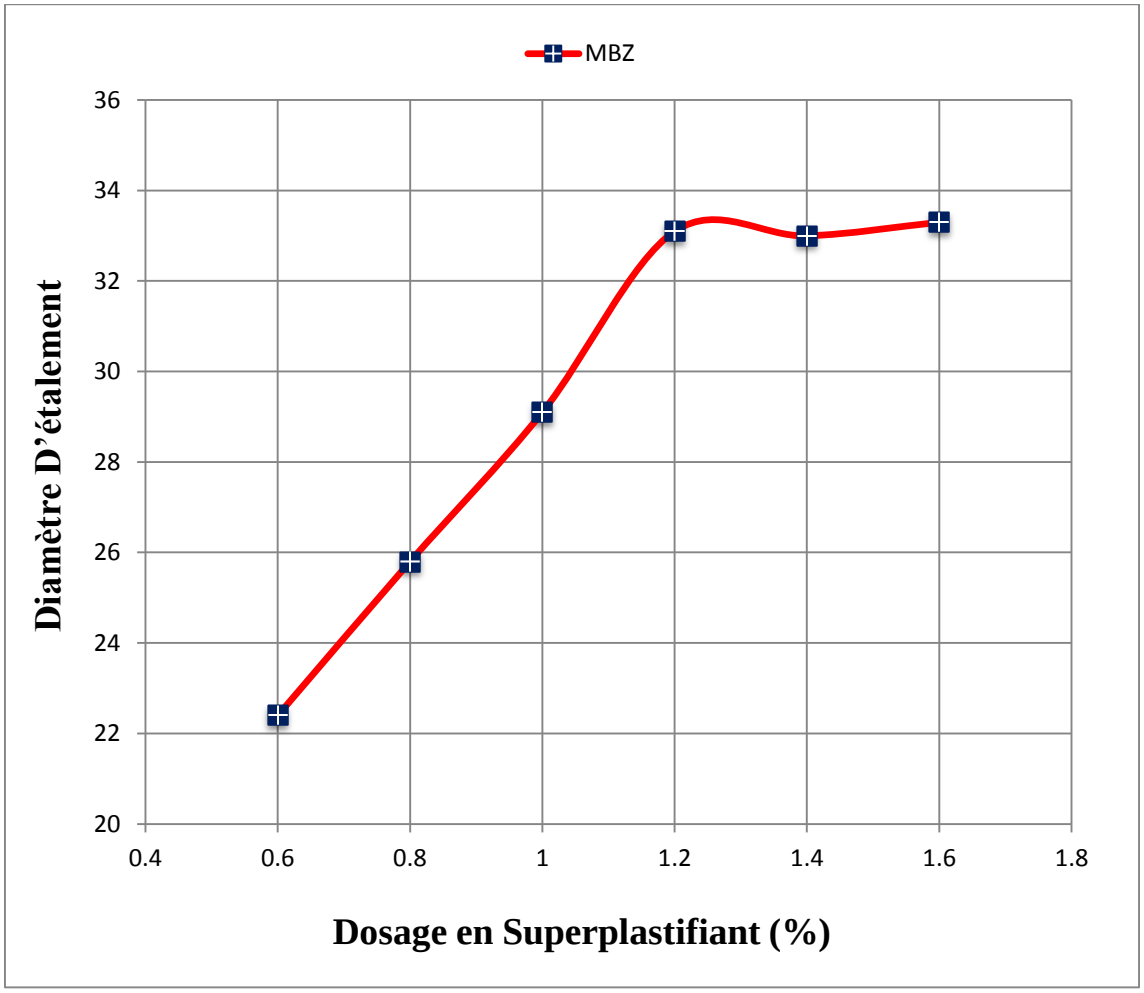


Figure IV.5. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid

Nous remarquons sur la Figure IV.5 l'augmentation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid, mais nous avons constaté qu'à partir de 1.2 % du dosage nous avons un mauvais mortier.

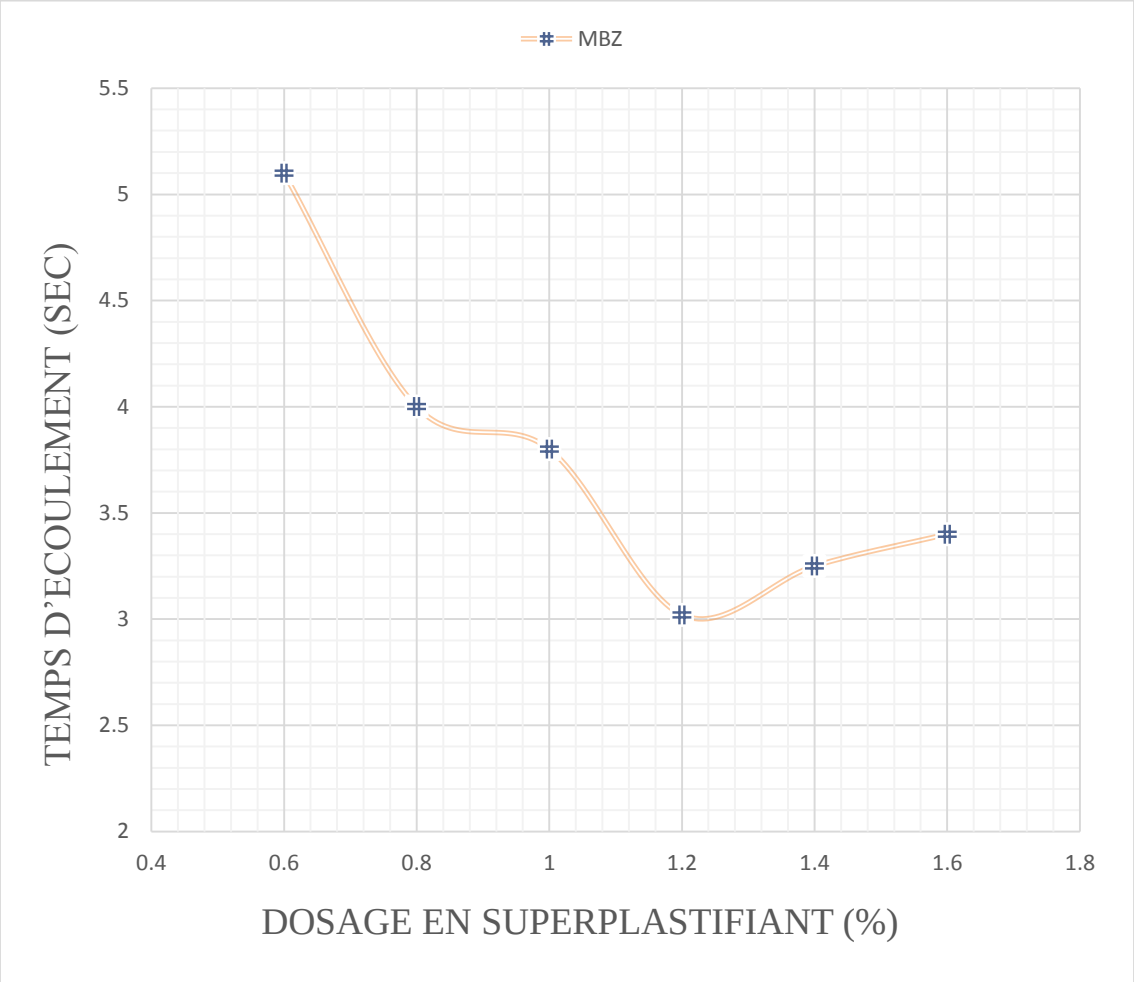


Figure IV.6. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid

La figure IV.6 montre que le temps d'écoulement a diminué à partir du dosage en superplastifiant de 0.6 % et 1.2 %. Nous avons remarqué après qu'il y a une augmentation du temps d'écoulement parce que nous avons un mauvais mortier.

IV.2.4. Sable de Boughzoule

Les résultats du diamètre d'étalement au mini cône et le temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Boughzoule, sont présentés sur le tableau IV.4 suivant. (Voir Annexe E)

Tableau IV.4. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Boughzoule

Mortier	**MBZ 1**	**MBZ 2**	**MBZ 3**	**MBZ 4**	**MBZ 5**	**MBZ 6**	**MBZ 7**	**MBZ 8**
Ciment(g)	997							
Sable (g)	1528							
Eau (g)	399							
Sp %	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
D_{moy} (mm)	250	271	290	301	335	328	325	324
Temps d'écoulement (sec)	7	6.84	4.9	4.97	3.7	4.10	4.30	4.55
Remarque	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène

Sur les figures IV.7 et IV.8, nous présentons la variation du diamètre d'étalement au mini cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable de Boughzoule.

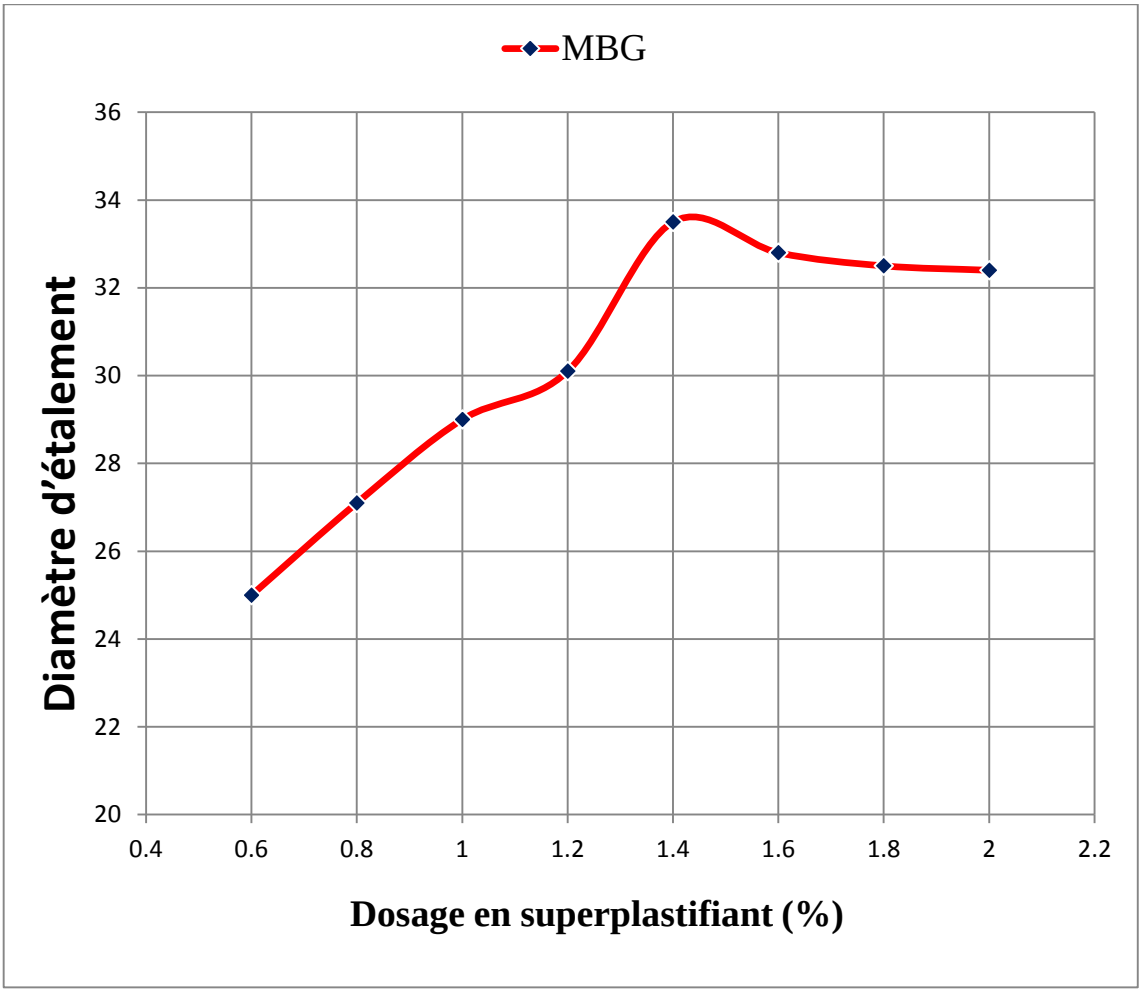


Figure IV.7. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Boughzoule

D'après la figure IV.7, nous remarquons que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant jusqu'à ce que nous arrivons à la valeur 1.4 % du dosage où nous avons constaté une simple descente de la courbe, ce qui nous permet de dire que cette valeur est le pourcentage optimal.

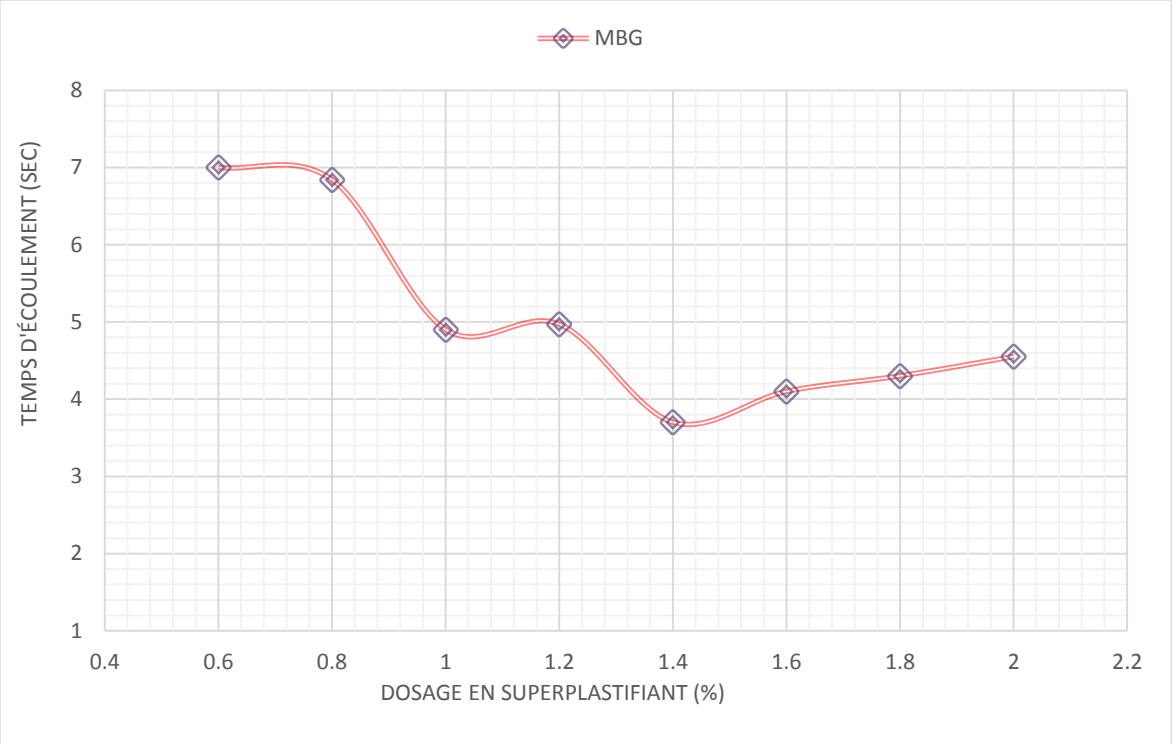


Figure IV.8. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Boughzoule

La figure IV.8 montre une diminution du temps d'écoulement avec l'augmentation du dosage en superplastifiant pour tous les mortiers à base de sable de Boughzoule. Elle montre aussi une descente en flèche du temps d'écoulement entre les valeurs de 0.6 % et 1.2 % du dosage et une petite diminution entre 1.2 % et 2 % du dosage.

IV.2.5. Sable de Hassi Bahbah

Les résultats du diamètre d'étalement au mini cône et le temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Hassi Bahbah, sont présentés dans le tableau IV.5 suivant :

Tableau IV.5. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Hassi Bahbah

Mortier	**MBH 1**	**MBH 2**	**MBH 3**	**MBH 4**	**MBH 5**	**MBH 6**	**MBH 7**	**MBH 8**
Ciment (g)	997							
Sable (g)	1525							
Eau (g)	399							
Sp %	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
D_{moy} (mm)	101	110	113	117	119	12.4	13	13.5
Temps d'écoulement (sec)	/	/	/	/	/	/	/	/
Remarque	/	/	/	/	/	/	/	/

Sur la figure IV.9 suivante, nous présentons la variation du diamètre d'étalement au mini cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable de Hassi Bahbah

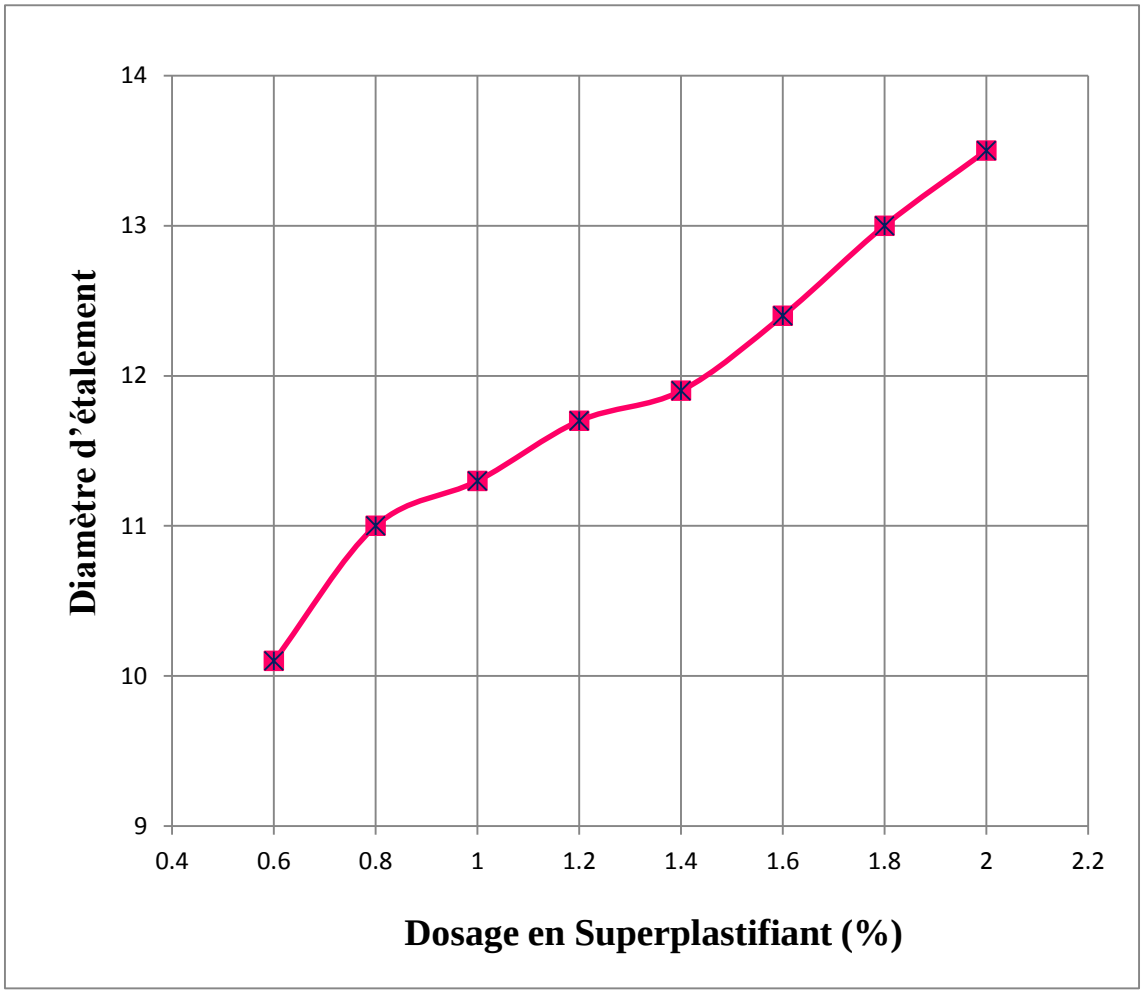


Figure IV.9. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Hassi Bahbah

Nous remarquons à partir de la figure IV.9 - ci-dessus que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant pour tous les mortiers mais toutes les valeurs obtenues sont inférieures à la fourchette recommandée du mortier autoplaçant. Ceci nous permet de dire que le mortier à base du sable de Hassi Bahbah n'est pas un mortier autoplaçant.

IV.2.6. Sable corrigé

Vu les résultats obtenus à l'état frais pour l'ensemble des sables utilisés, Nous avons remarqué que le sable de Hassi Bahbah n'a pas donné un mortier autoplaçant avec tous les dosages en superplastifiant. Pour cette raison, nous avons proposé de le corriger avec le sable concassé de mont Gorno. La correction a été faite de façon à avoir un sable de module de finesse voisin au module de finesse de sable normalisé. À cet effet nous avons mélangé 40 % de sable de Hassi Bahbah avec 60 % du sable concassé de Mont gorno ce qui a donné un module de finesse de l'ordre de 2.42.

La formulation du mortier à base de sable corrigé ainsi les résultats des essais à l'état frais, sont présentés dans le tableau IV.6 suivant.

Tableau IV.6. Résultats du diamètre d'étalement et temps d'écoulement pour l'ensemble des mortiers à base du sable corrigé

Mortier	**MCR 1**	**MCR 2**	**MCR 3**	**MCR 4**	**MCR 5**	**MCR 6**	**MCR 7**	**MCR 8**
Ciment(g)	981							
Sable (g)	1555							
Eau(g)	399							
Sp %	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
D_{moy} (mm)	265	281	325	330	354	349	/	/
Temps d'écoulement (sec)	12.9	7.8	4.7	4.24	3.94	4.93	/	/
Remarque	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène	Ressuage + ségrégation	Ressuage + ségrégation	/	/

Sur les figures IV.10 et IV.11, nous présentons la variation du diamètre d'étalement au mini cône et celle du temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers de sable corrigé.

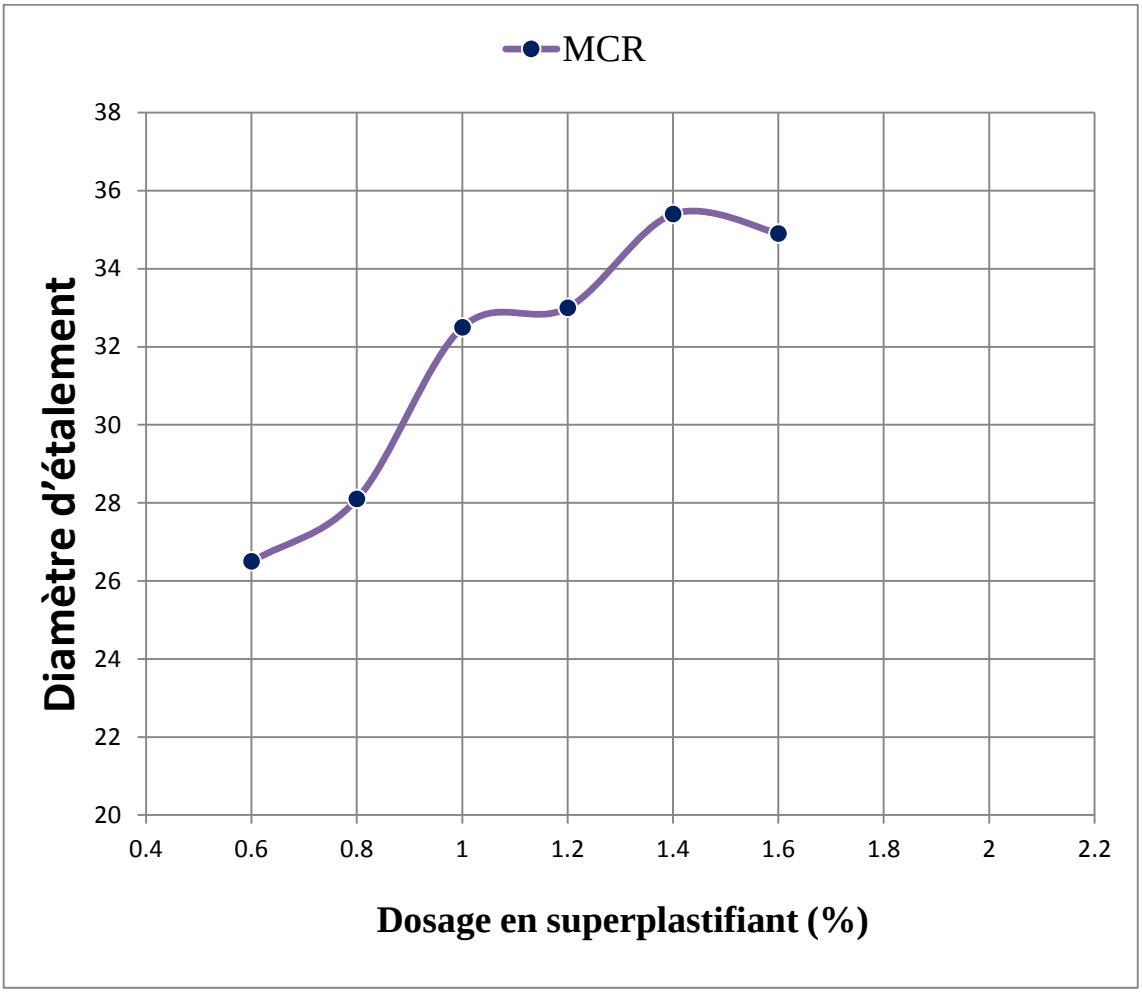


Figure IV.10. Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable corrigé.

D'après la figure IV.10, nous observons que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant pour tous les mortiers à base de sable corrigé. Nous avons constaté une augmentation considérable du diamètre entre les valeurs de 0.6 % et 1.2 % du dosage et une stagnation à partir de ce dernier pourcentage. Ceci nous permet de dire que cette valeur (1.2 % du dosage) est le pourcentage optimum.

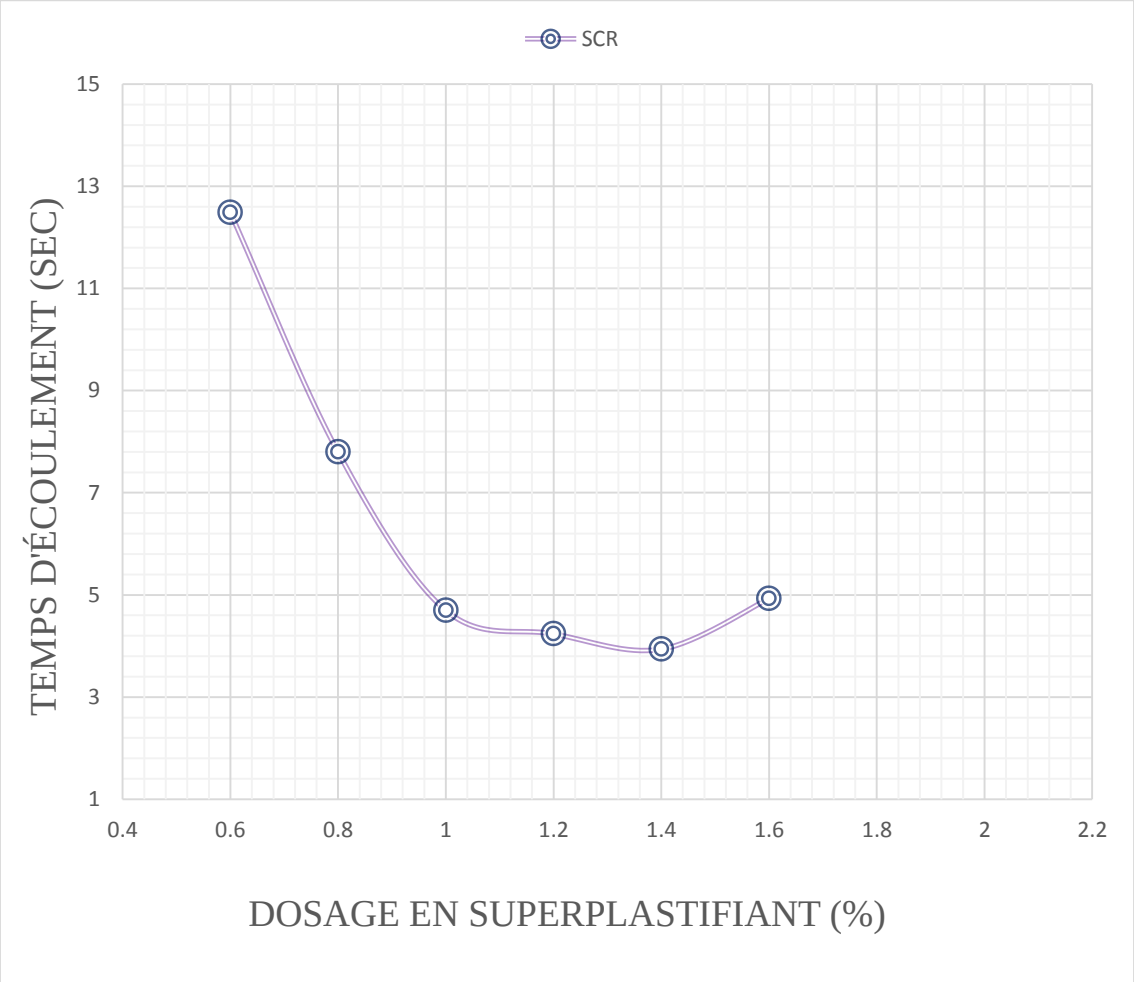


Figure IV.11. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable corrigé.

La figure IV.11, démontre qu'il y a une diminution rapide du temps d'écoulement avec l'augmentation du dosage en superplastifiant entre 0.6 % et 1.2 %. Dépassée cette valeur nous avons un mauvais mortier.

IV.2.7. Comparaison des différents sables à l'état frais

La figure IV.12, présente une étude comparative entre les diamètres d'étalement au mini cône en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés.

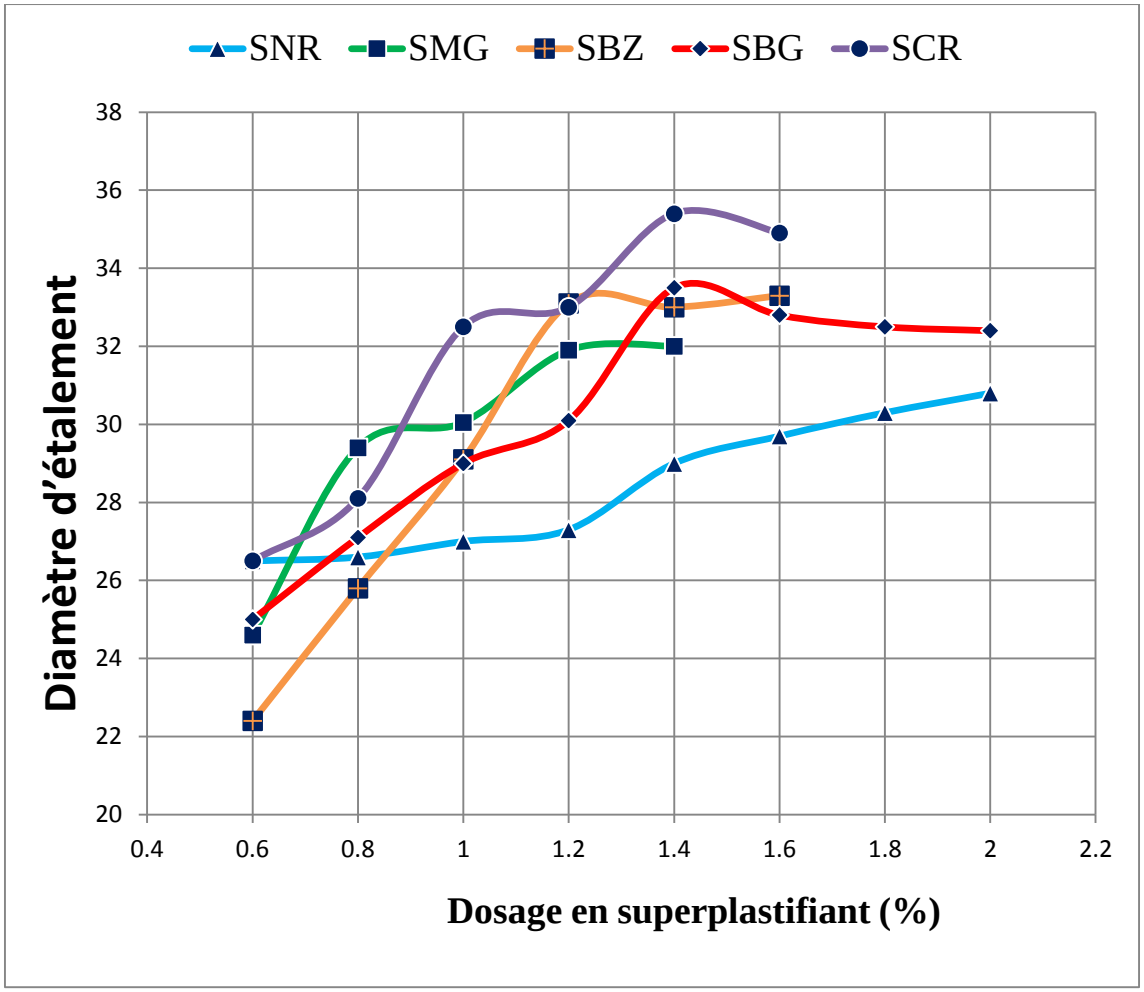


Figure IV.12. Comparaison du diamètre d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés

A partir de la figure IV.12, nous remarquons que tous les mélanges donnent un mortier à partir de la valeur 0.8 % du dosage du superplastifiant jusqu'à 2 %.

Avec 0.8 % du superplastifiant, nous avons obtenu un bon mortier autoplaçant pour les trois mélanges concassé, corrigé et Boughzoule, mais à partir de 1.4 % nous retrouvons des mélanges qui dépassent la fourchette parce qu'il y a ségrégation et ressuage.

Sur la figure IV.13 ci-après, nous illustrons une étude comparative entre les temps d'écoulement à l'entonnoir V-Funnel en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés.

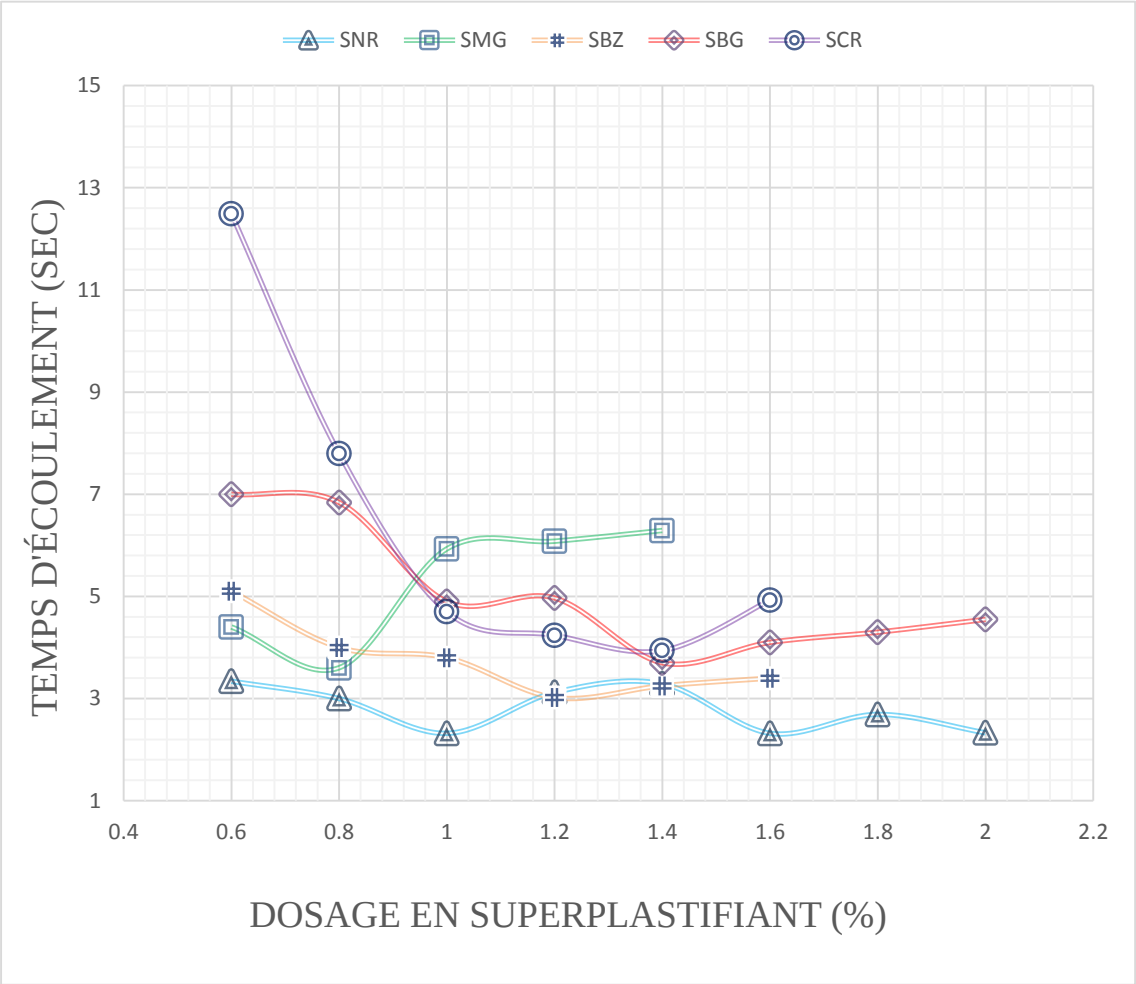


Figure IV.13 Comparaison du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés

A partir de la figure IV.13, nous remarquons que le temps d'écoulement de tous les mortiers se trouve à l'intérieur de la fourchette à partir de 0.8 % du dosage du superplastifiant, ce qui confirme le résultat représenté par la figure précédente.

IV.3. Résultats expérimentaux à l'état durci

IV.3.1. Sable normalisé

Le tableau IV.7, présente les résultats des résistances mécaniques pour l'ensemble des mortiers à base du sable normalisé.

Tableau IV.7. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable normalisé

Mortier	Sp (%)	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
MN1	0,6	-	-	-	-
MN2	0,8	-	-	-	-
MN3	1	-	-	-	-
MN4	1,2	7,24	7,92	51,69	62,66
MN5	1,4	6,81	7,52	53,59	55,82
MN6	1,6	5,28	7,69	45,93	55,5
MN7	1,8	4,20	8,08	50,81	63,23
MN8	2	2,23	4,93	44,18	54,31

La variation des résistances à la compression et traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable normalisé est présentée sur les figures IV.14 et IV.15suivantes.

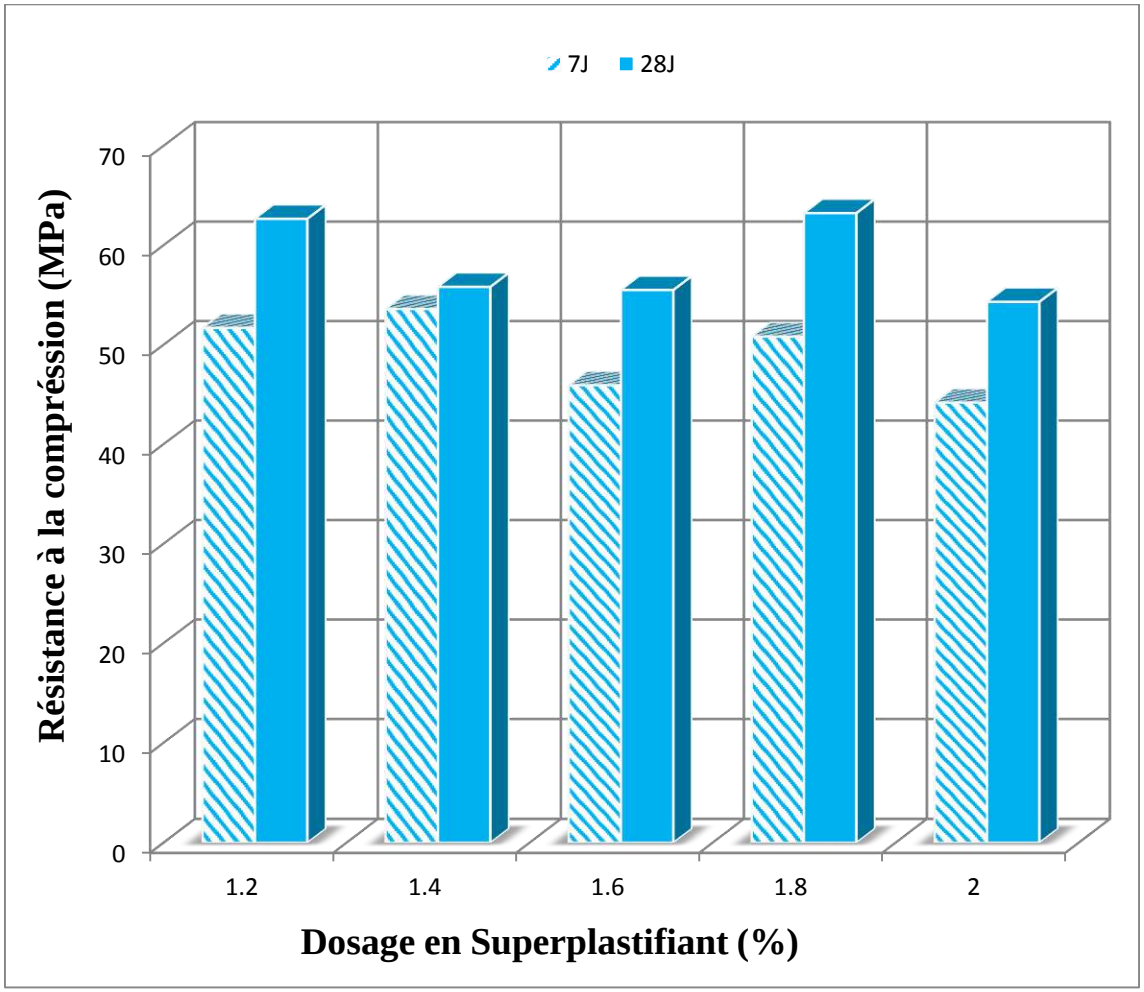


Figure IV.14. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé

D'après le tableau IV.7 et la figure IV.14, nous avons remarqué que la valeur optimale de la résistance à la compression est de 1.2 %. Nous avons trouvé qu'à l'état frais cette valeur optimale était de 1.4%, ce qui nous a permis de dire que la valeur optimale variait entre 1.2 % et 1.4 % du dosage.

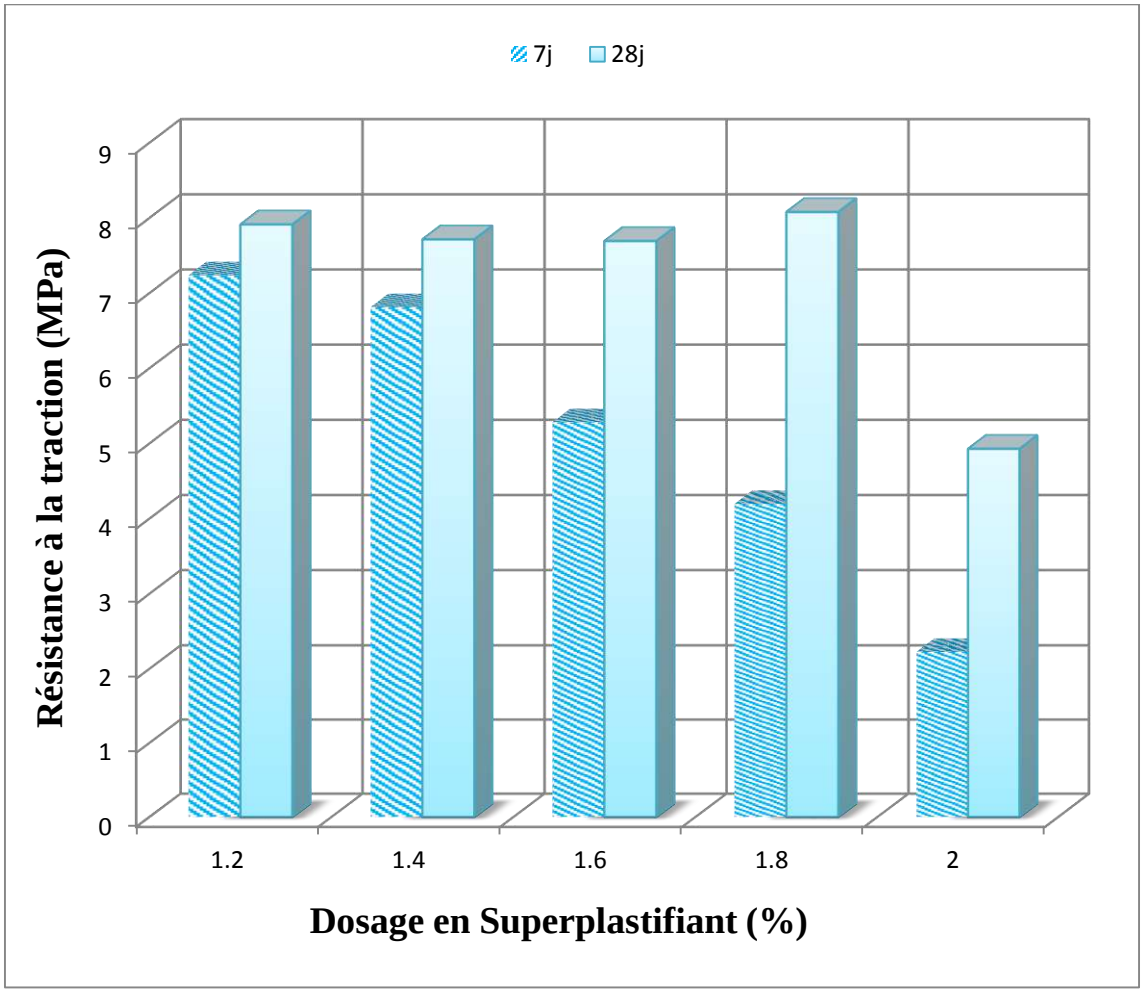


Figure IV.15. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable normalisé

D'après la figure IV.15, nous pouvons dire que les résultats de la résistance à la traction confirment les résultats de la résistance de la compression et ceux de nos essais à l'état frais.

IV.3.2. Sable concassé (Mont Gorno)

Les résultats des résistances mécaniques pour l'ensemble des mortiers à base du sable concassé, sont présentés dans le tableau IV.8 suivant.

Tableau IV.8. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable concassé

Mortier	Sp (%)	Résistance à la traction (MPA)		Résistance à la compression (MPA)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
MC1	0,6	7,71	8,54	61,23	64,22
MC2	0,8	7,79	9,18	63,35	66,2
MC3	1	5,78	8,13	61,88	65,7
MC4	1,2	5,37	7,41	50,55	56,16
MC5	1,4	4,34	7,36	47,17	52,24
MC6	1,6	-	-	-	-
MC7	1,8	-	-	-	-
MC8	2	-	-	-	-

Les figures IV.16 et IV.17 suivantes, présentent la variation des résistances à la compression et traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable concassé.

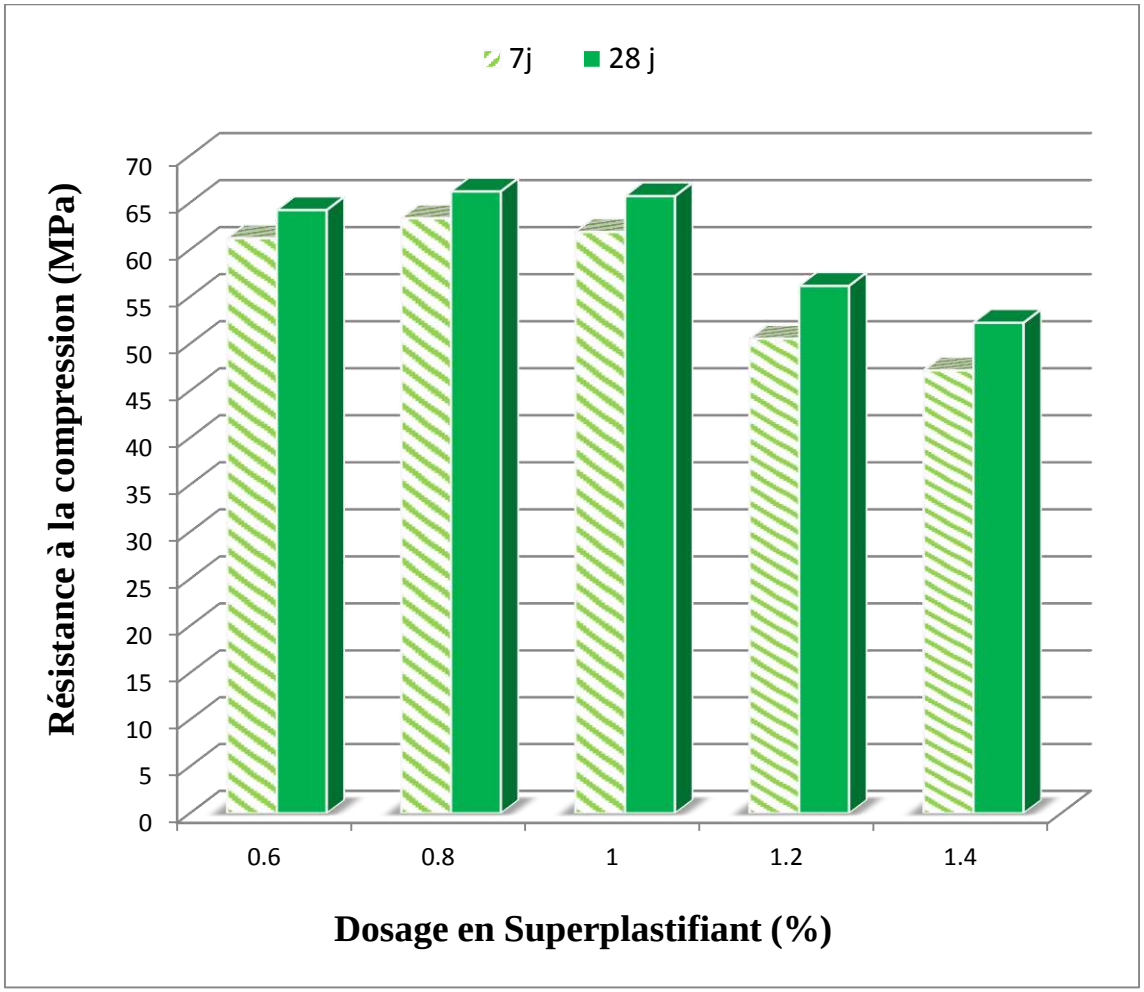


Figure IV.16. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable concassé

Dans la figure IV.16, nous pouvons remarqué que les valeurs de la résistance diminuent en fonction du dosage en superplastifiant à partir de la valeur 1 % du dosage, ce qui nous permet de dire que la valeur optimum est égale à 1 % , confirmant ainsi les résultats de l'ouvrabilité.

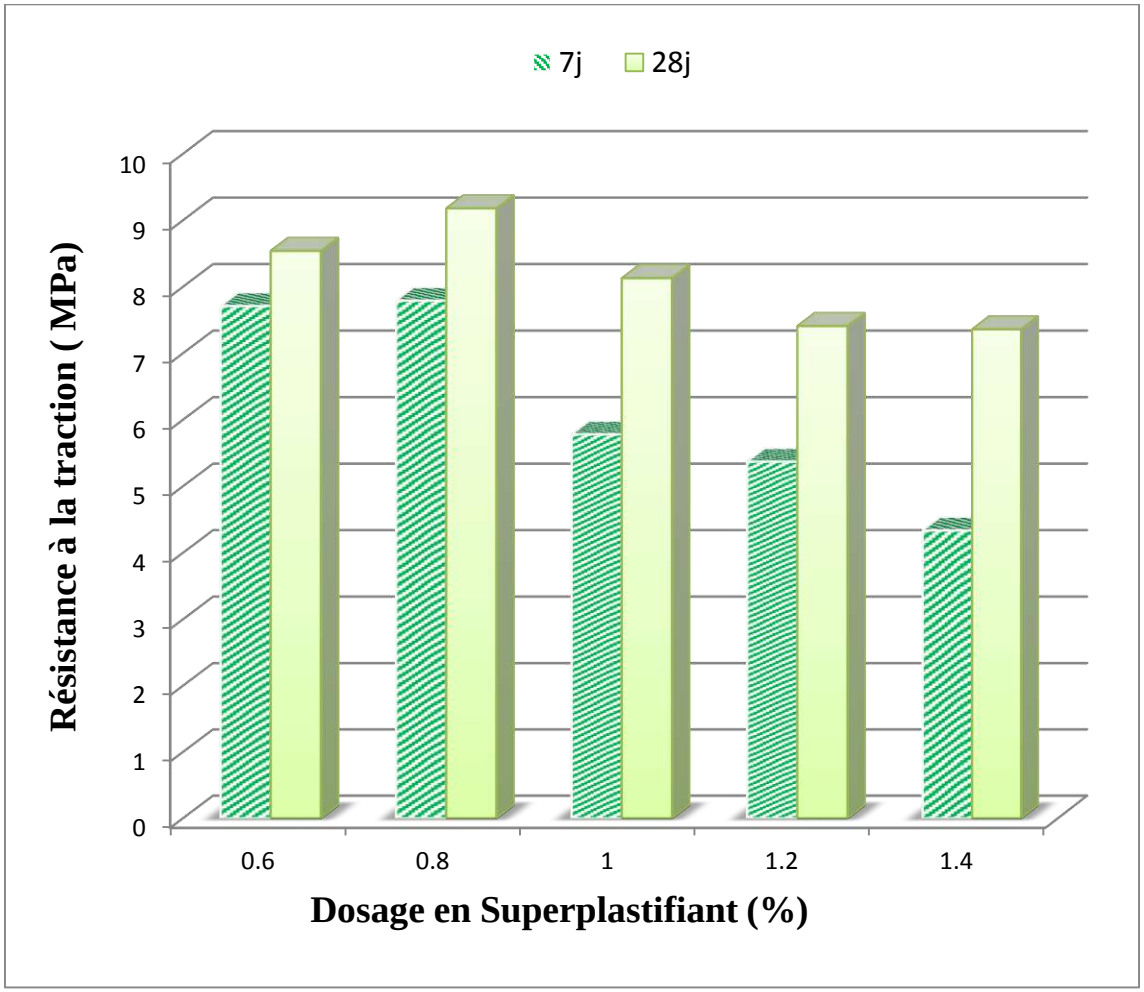


Figure IV.17. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable concassé

D'après la figure IV.17 nous constatons que la valeur optimale est égale à 0.8 % et la figure IV.16 a démontré que cette valeur était égale à 1 % ce qui nous amène à dire que cette valeur optimum était comprise entre 0.8 % et 1 % du dosage.

IV.3.3. Sable de Sidi Bayazid

Le tableau IV.9, présente les résultats des résistances mécaniques pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid.

Tableau IV.9. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid

Mortier	Sp (%)	Résistance à la traction (MPA)		Résistance à la compression (MPA)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
MBZ1	0,6	-	-	-	-
MBZ2	0,8	-	-	-	-
MBZ3	1	5,61	9,18	57,38	65,16
MBZ4	1,2	4,31	9,16	51,72	61,21
MBZ5	1,4	3,57	9,05	51,47	59,37
MBZ6	1,6	2,57	8,06	41,59	51,56
MBZ7	1,8	-	-	-	-
MBZ8	2	-	-	-	-

La variation des résistances à la compression et traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable de Sidi Bayazid est présentée sur les figures IV.18 et IV.19 suivantes.

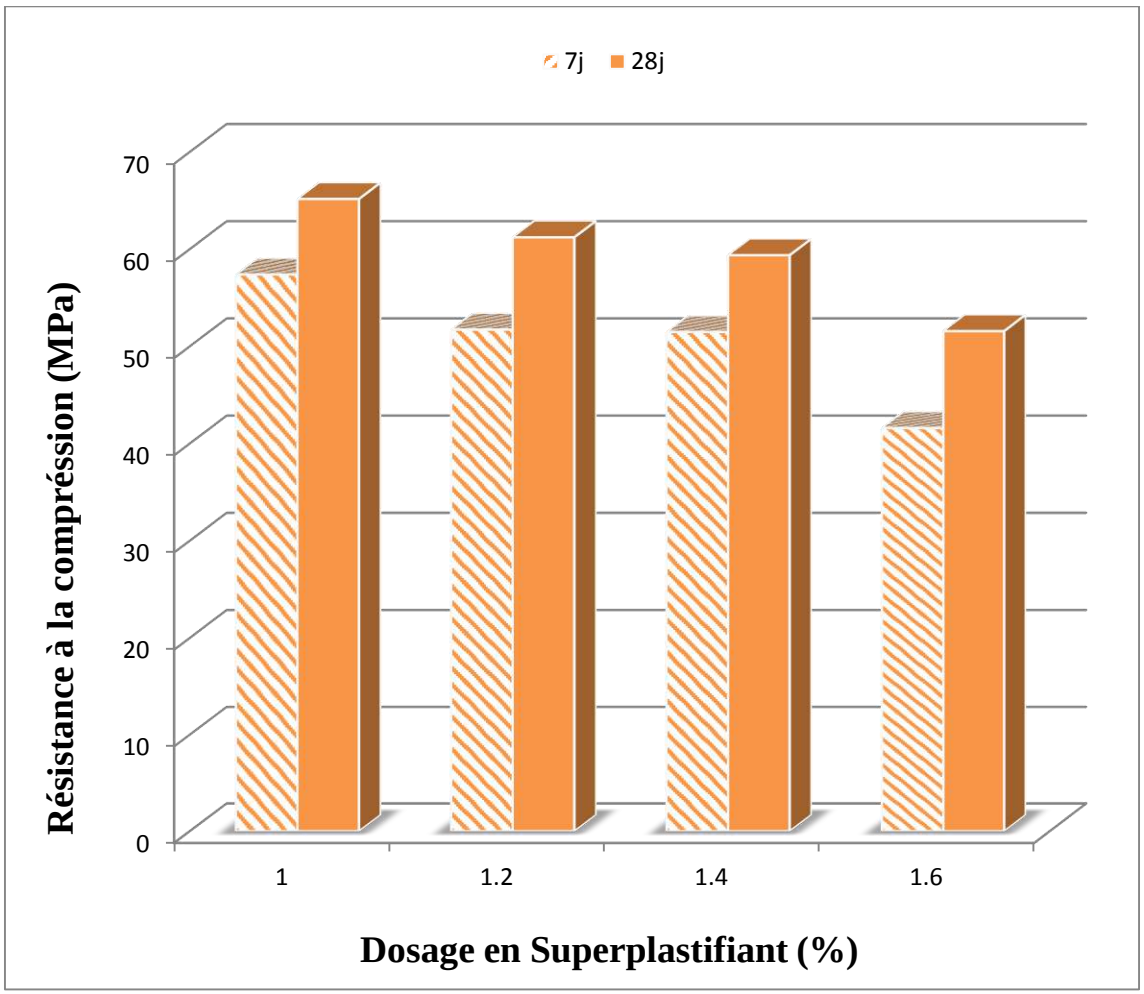


Figure IV.18. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid

D'après le tableau IV.9 et la figure IV.18, nous trouvons que le mortier du dosage en superplastifiant (1%) a favorisé les meilleures résistances à la compression par rapport aux autres mortiers à base de sable de Sidi Bayazid, ce qui confirme nos résultats obtenus aux essais à l'état frais.

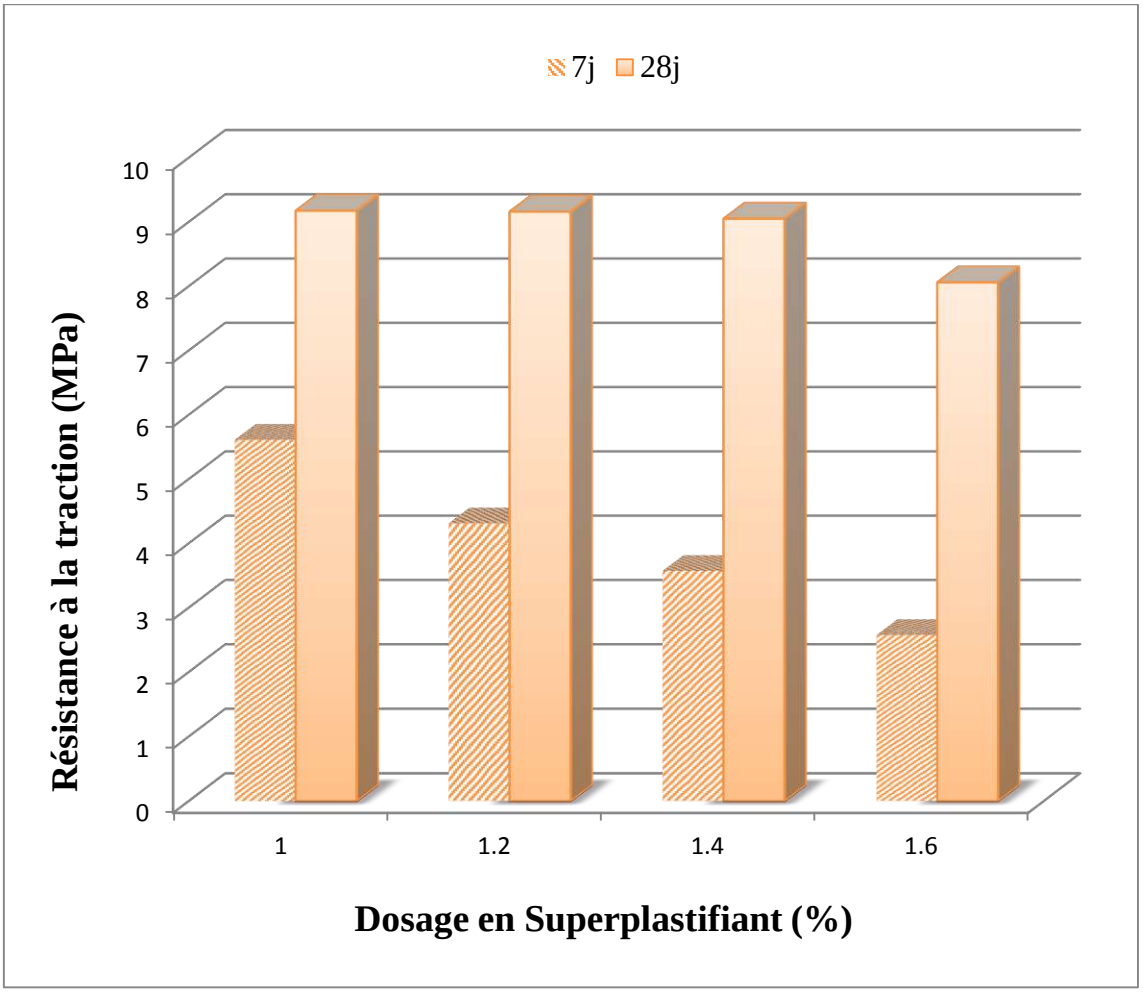


Figure IV.19. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid

D'après la figure IV.19 les résultats de la variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Sidi Bayazid confirment ceux obtenus aux essais à l'état frais et celui de l'essai à l'état durci de compression.

IV.3.4. Sable de Boughzoule

Le tableau IV.10, présente les résultats des résistances mécaniques pour l'ensemble des mortiers à base du sable de Boughzoule

Tableau IV.10. Résistances mécaniques des mortiers à base du sable de Boughzoule

Mortier	Sp (%)	Résistance à la traction (MPA)		Résistance à la compression (MPA)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
MBZ1	0,6	46.07	50.06	4.464	4.71
MBZ2	0,8	43.61	47.15	7.298	7.98
MBZ3	1	52.91	50.03	6.880	6.98
MBZ4	1,2	53.26	53.26	7.381	8.148
MBZ5	1,4	59.62	61.31	6.533	9.618
MBZ6	1,6	52.10	55.88	8.519	7.69
MBZ7	1,8	50.12	54.95	6.22	6.72
MBZ8	2	53.76	54.02	5.353	6.98

La variation des résistances à la compression et traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable de Boughzoule est présentée sur les figures IV.20 et IV.21 suivantes.

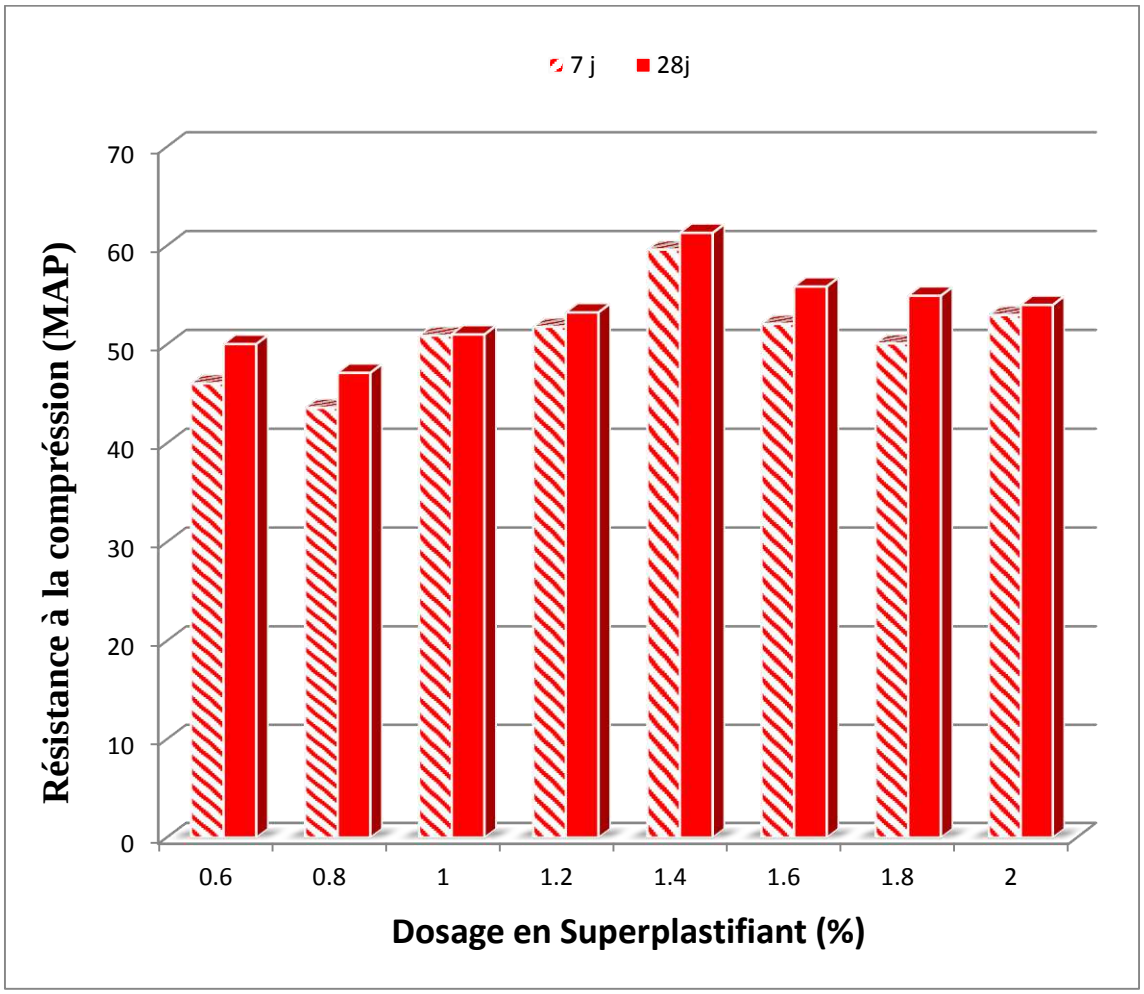


Figure IV.20. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du Boughzoule

D'après la figure IV.20 nous remarquons que la valeur optimum est égale à 1.4 % et nous avons constaté précédemment que la valeur optimale à l'état frais était égale à 1.2 % c'est pourquoi nous pouvons déduire que cette valeur est comprise entre 1.2 % et 1.4 %.

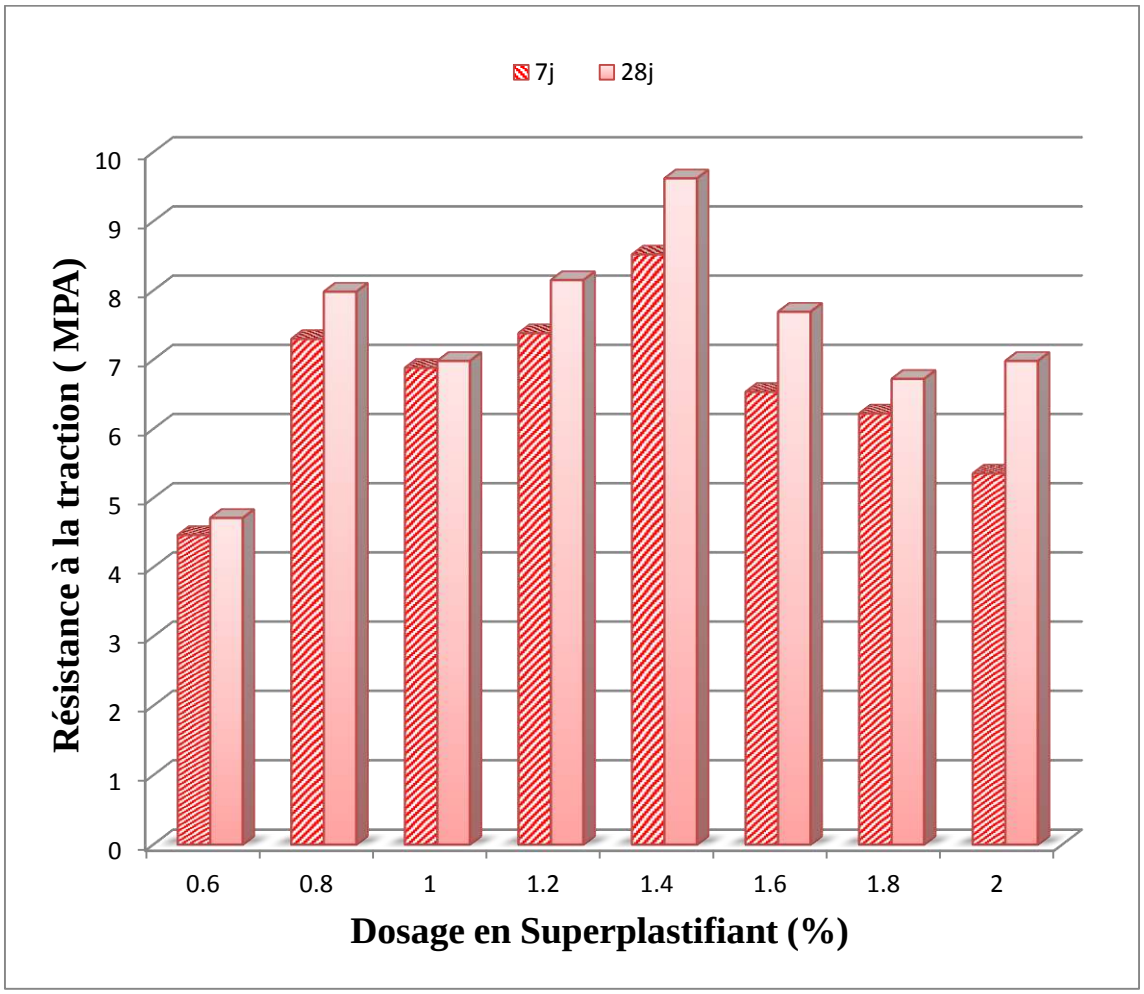


Figure IV.21. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable de Boughzoule

Les résultats de la figure IV.21 confirment ceux obtenus aux essais précédents et représentés par le graphe IV.20.

IV.3.5. Sable corrigé

Les résultats des résistances mécaniques pour l'ensemble des mortiers à base du sable concassé, sont présentés dans le tableau IV.11 suivant.

Tableau IV.11. Résistances mécaniques des mortiers

à base du sable corrigé

Mortier	Sp (%)	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
MCR1	0,6	-	-	-	-
MCR2	0,8	3,11	5,32	43,32	58,20
MCR3	1	4,55	6,50	49,87	63,69
MCR4	1,2	5,35	8,17	56,94	63,89
MCR5	1,4	3,55	7,04	56,69	61,44
MCR6	1,6	2,76	6,90	53,55	58,95
MCR7	1,8	-	-	-	-
MCR8	2	-	-	-	-

Sur les figures IV.22 et IV.23 suivantes, nous présentons la variation des résistances à la compression et traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base du sable concassé.

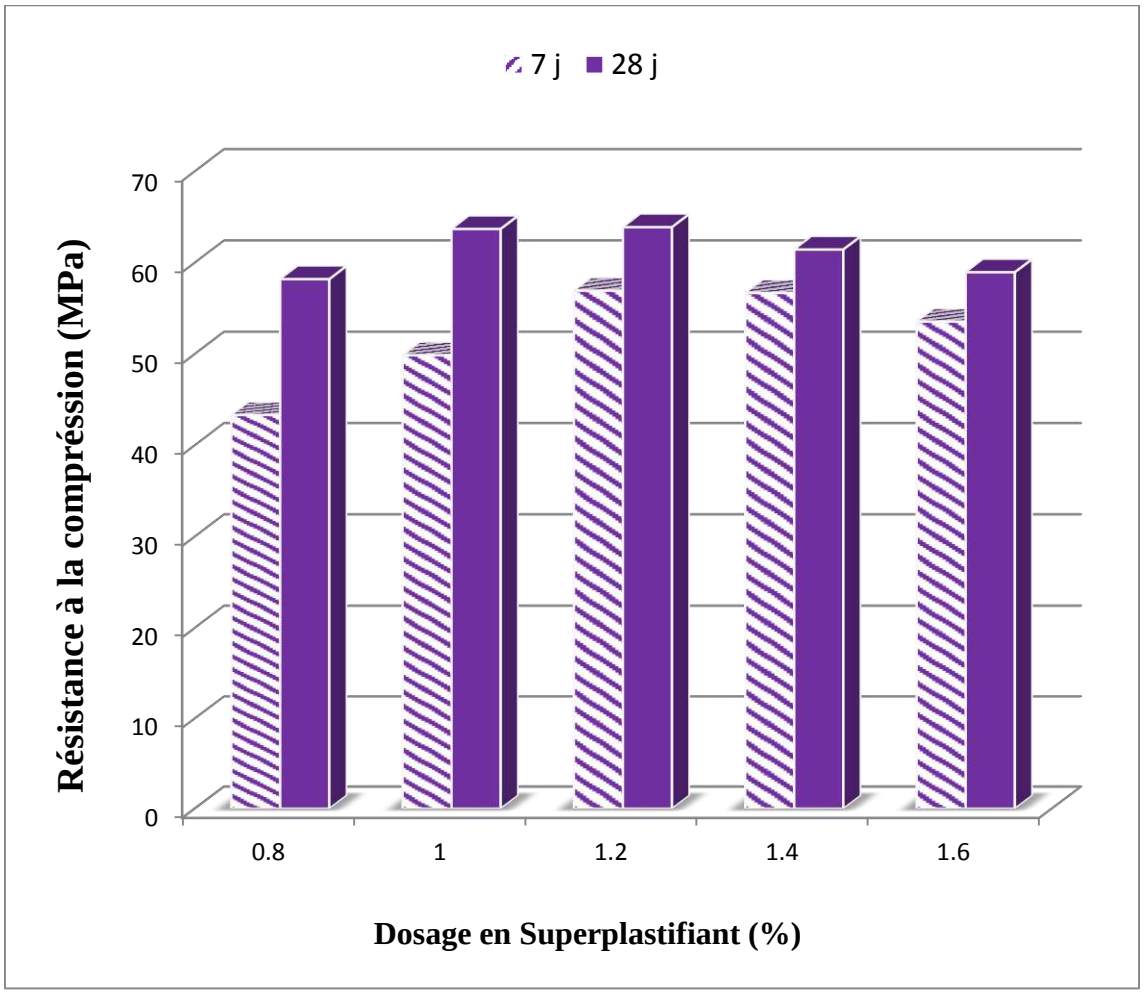


Figure IV.22. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable corrigé

D'après la figure IV.22 et le tableau IV.11 nous remarquons que les mortiers des dosages 1 % et 1.2 % possèdent une meilleur résistance, ce qui confirme le résultat de la valeur optimale que nous avons obtenu à l'état frais.

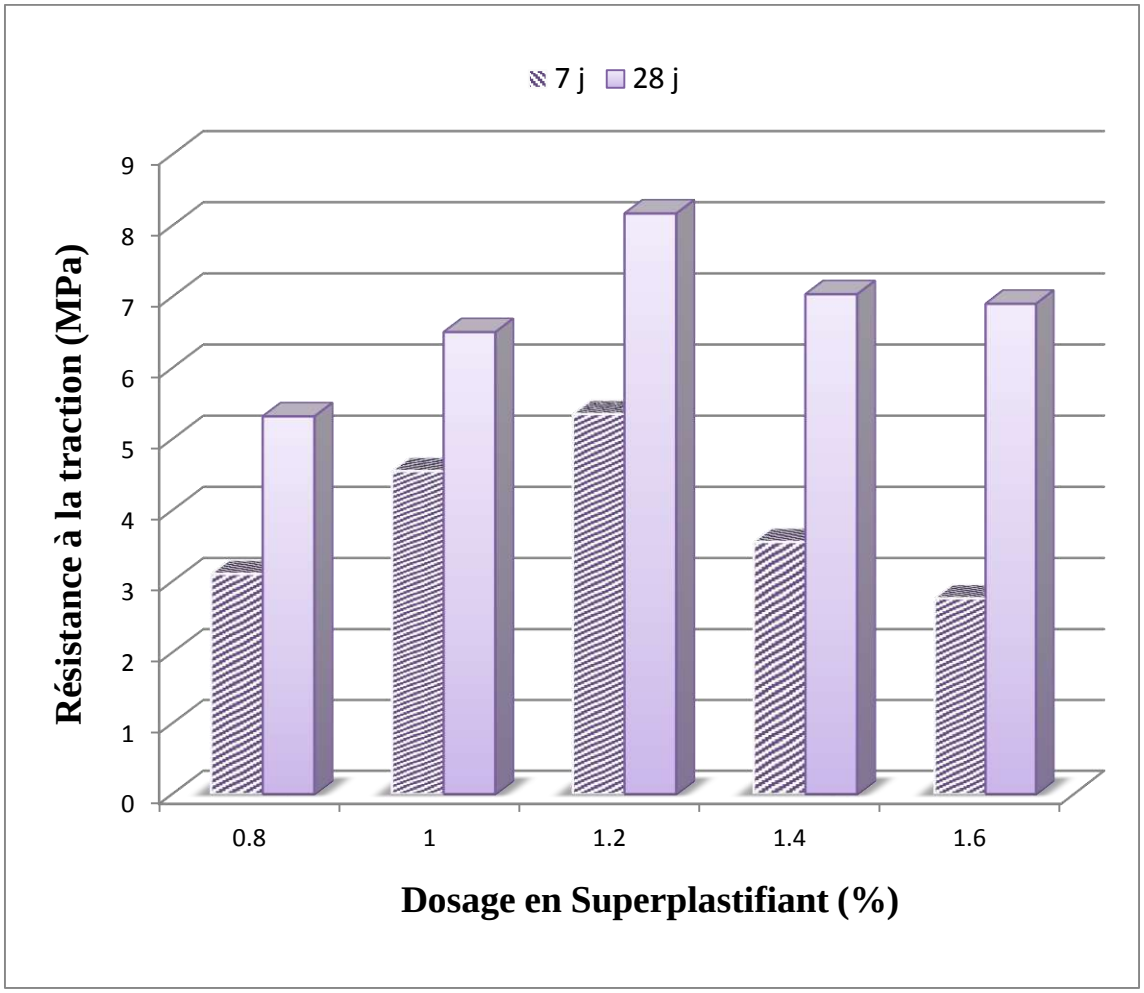


Figure IV.23. Variation de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant des mortiers à base du sable corrigé

D'après la figure IV.23, nous constatons que la résistance à la traction était élevée à 1.2 % ce qui confirme les résultats précédents des essais à base du sable corrigé.

Tableau IV.12 le dosage optimum de superplastifiant de différent sable correspond à son module de finesse

Sable	Normalisé	Djelfa	Boughzoule	Hassi Bahbah	Mont Gorno	Corrigé
MF	2.32	1.63	1.57	0.86	3.47	2.42
Opetimum%	1.2	1	1.2	/	1	1.2

Sur les figures IV.24 suivantes, nous présentons la variation des résistances à la compression en fonction du dosage en superplastifiant pour les mortiers à base des différents sables utilisés

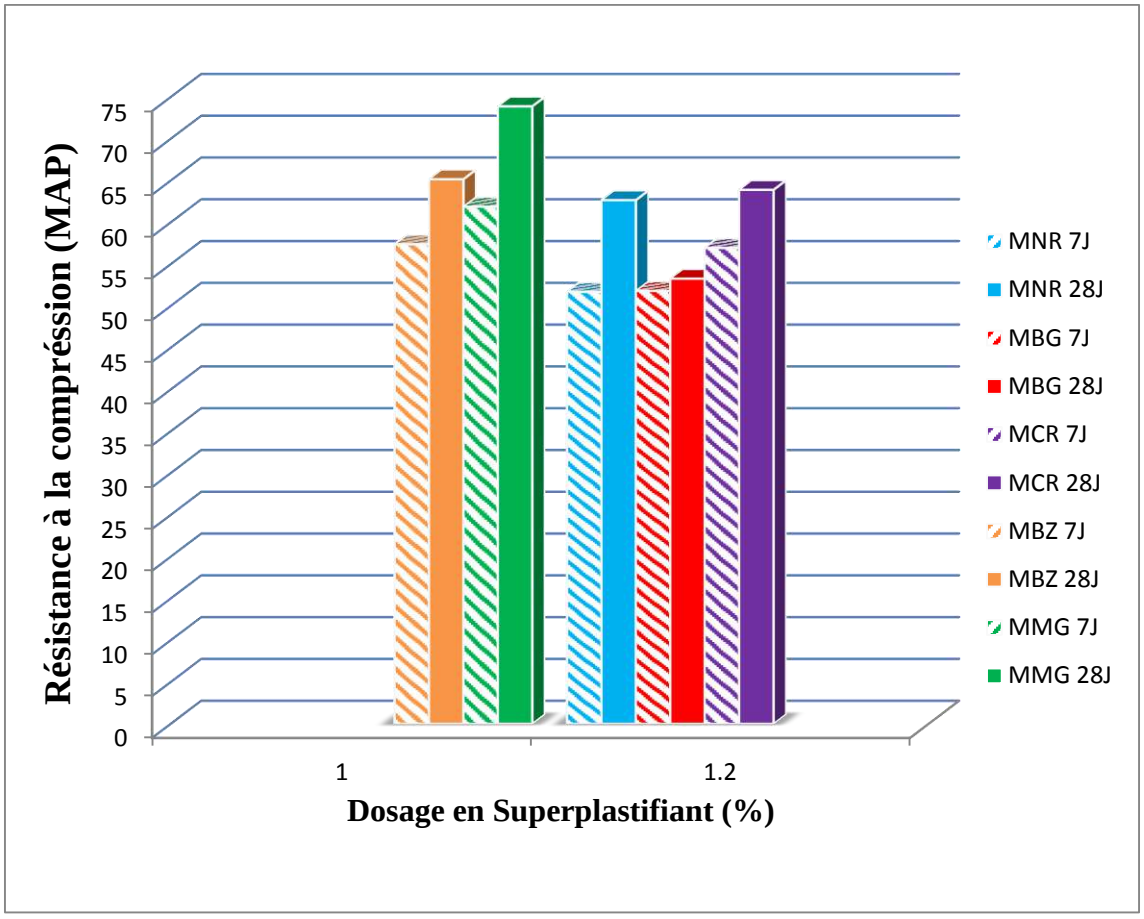


Figure IV.24 Comparaison du résistance à la compression d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés

D'après la figure IV.24, nous trouvons que le mortier à base d'un sable concassé a une bonne résistance et demande un peu d'adjuvants.

Les trois autres sables (Boughzoul, Normalisé et corrigée) ont une demande variée entre (50 % à 60 %) pour le sable corrigé, alors que celui de boughzoul exige (50 % à 57 %) et le normalisé (54 % à 65 %) pour le même comportement à 7 jours.

Et D'après le Tableau IV 12 le sable concassé a un module de finesse équivalent á 3.47 et les autres exigent un module de 1.63 jusqu'à 2.32. Nous remarquons que l'influence du module de finesse sur la résistance varie : plus la finesse est grande plus la résistance est importante.

A 7 jours nous remarquons une très grande résistance à cause de la compacité du mortier autoplaçant. La comparaison entre 7 jours et 28 jours : nous remarquons que les résistances à 7 jours sont considérables et sont représentées entre 80 à 90 %, cela est surement dû á la bonne compacité du mortier autoplaçant. Les résistances à 28 jours : ce qui n'est pas le cas des mortiers ou des bétons ordinaires.

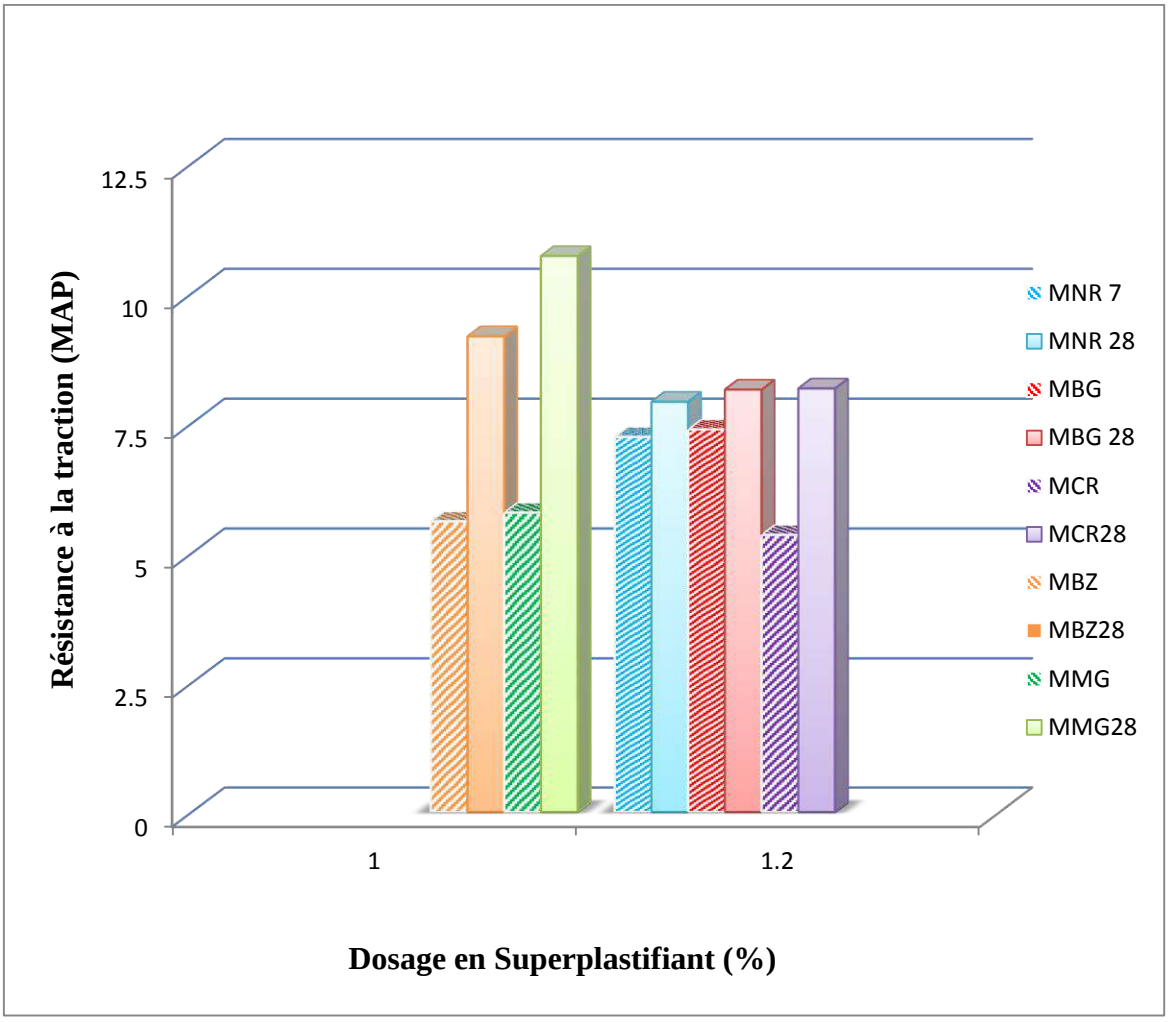


Figure IV.25. Comparaison de la résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables utilisés

D'après la figure IV.25, nous pouvons dire que les résultats de la résistance à la traction confirment les résultats de la résistance de la compression et ceux de nos essais à l'état frais.

IV.4. CONCLUSION

Grâce à ce chapitre nous avons pu tester et étudier les différents mortiers, réalisés par l'étalement et l'écoulement, ainsi que leurs caractéristiques à l'état durci à travers les essais de flexion et de compression. Ces tests nous ont permis de constater que :

- Parmi les cinq types de sable, un seul type ne convient pas pour la fabrication d'un mortier autoplaçant.
- Les résultats de l'état frais confirment les résultats de l'état durcis.
- Le sable mont Gorno est un bon échantillon du sable algérien.

CONCLUSION GENERALE

[Document subtitle]

[DATE]

[COMPANY NAME]

[Company address]

Le sable est l'un des nombreux matériaux qui rentrent dans la composition du béton. Son coût et sa disponibilité font de lui un élément essentiel et très important dans le domaine de la construction et du bâtiment. C'est la raison pour laquelle une grande partie de notre travail lui a été réservé afin de tester et d'étudier ses différentes caractéristiques et propriétés afin de mieux l'exploiter.

La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1- Le sable a un rôle très important dans le comportement des mélanges de mortier car il représente le pourcentage de 40% en volume par rapport au mortier.
2- L'influence de module de finesse sur l'ouvrabilité et sur la résistance.
3- Les mélanges qui ont un module de finesse important améliorent la résistance et demande un petit dosage de superplastifiant.
4- Le sable concassé dont le dosage est de 1.4% de superplastifiant donne un ressuage parce qu'il n'y a pas plusieurs des fines et la conception est aussi sur le sable concassé.
5- Nous pouvons obtenir des résistances à la compression et à la traction élevée en jouant sur la finesse des sables. C'est à voir avec la correction des sables

Recommandations

Afin de compléter cette recherche, nous suggérons les recommandations suivantes qui permettront d'ouvrir les portes sur d'autres recherches plus approfondies concernant certains aspects techniques des bétons autoplaçants **:**

- Etude de l'effet de la nature et du type de sable sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton autoplaçant
- Agent de viscosité.
- Le pourcentage de correction
- Etude de l'influence d'autres sable par exemple le sable de mer.
- Etude de différent sable à différent types de superplastifiant.
- Varier le rapport E/C avec un minimum de superplastifiant
- Utiliser différents types de ciment.
- Effet des sables en présence des additions minéral tel que laitier, pouzzolane.

Références Bibliographiques

[1] Baron J. Et Ollivier J.P., « Les bétons – Bases et données pour leur formulation » Editions Eyrolles, 1996, 243 p.

[2] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[3] Okamura. H, and M. Ouchi, «Self Compacting Concrete: Development, present use and future», In self compacting concrete: Proceedings of the first international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999..

[4] Walraven « Structural aspect of self- compacting concrete » proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003,Reykjavik, Islande, pp. 15-22.

[5] Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons AutoPlaçants Recommandations provisoires » juillet 2002, 63 pages.

[6] Billberg P. « Form Pressure generated by self-compacting concrete »Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 271-280.

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

[8] Hanaa RARES « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée »07 Décembre 2009

[9] Sedran T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, pp. 53-60, marsavril, 1995.

[10] Hasni L., "Bétons autoplaçants - Synthèse bibliographique", rapport de recherche CEBTP, 46 p., juillet 1999.

[11] Maher EL BARRAK « contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais »

[12] 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

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

[14] G.Dreux, J.Festa, «Nouveau Guide du Béton et Ses Constituants », 8èmeEdition, Edition Eyrolles.1998.

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

[16] ADAM M.NEVILLE, Michel Pigeon :« Propriétés des bétons », traduit par CRIB Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton SHERBOOKEL aval-éditions Eyrolles 2000-paris.

[17] LE LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE POLYNESI, Notice technique : « La durabilité des bétons », 2008.

[18] CIM béton, Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications : « Les ouvrages en béton : durabilité dimensionnement et esthétique », Tome 3, Paris, 12/2008.

[19] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[20] Okamura H. and Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède pp. 3-14.

[21] J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, le béton autoplaçant ou autocompactant, 2000.

[22] Z. ABIB, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », thèse de magister USTHB, 2004

[23] ROUIS F. « formulation et propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant a basse ciment pouzzolanique et (ou) ciment de laiter »

[24] EL BARRAK M. « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'université toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005, 228 pages.

[25] Bethmont S. « Mécanismes de segrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des intéractions granulaires » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2005.

[26] Flatt R.J. « Polymeric dispersants in concrete. In Polymers inparticulatesystems - Properties and applications » Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages.

[27] Efnarc « The European guidelines for self-compacting concrete » The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
www.efnarc.org, 2005, 68p

[28] Uchikawa H., Hanehara S., and Sawaki D. « The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture »Cement and Concrete Research, 1997, vol 27, pp.37–50.

[29] Neubauer C.M., Yang M. And Jennings H.M. «Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspenions - effects of admixtures » Advanced Cement Based Materials, 1998, vol 8, pp. 17– 27.

[30] Flatt R.J., Houst Y.F., Bowen P., Hofmann H., Widmer J., Sulser U., Maeder U. and Bürge T.A. « Interaction of superplasticizers with model powders in a highly alkaline medium » In Fifth CANMET/ACI International Conference, 1997

[31] Agarwal S.K., Masood I. and Malhotra S.K. « Compatibility of superplasticizers with different cements » Construction and Building Materials, 2000, vol 14, pp. 253-259.

[32] Sonebi M. and Bartos P.J.M. « Filling ability and plastic settlement of selfcompacting concrete » Materials and Structures, 2002, Vol 35, pp. 462-469.

[33] Couarraze, G. et Grossiord, J.L. « Initiation à la rhéologie » Lavoisier, Paris, 1983, 219 pages

[34] Beaupré D. and Mindess S. « Rheology of Fresh Concrete: Principles, Measurement, and Applications » MateriaI Science of Concrete V edited by JSKALNY, S.MINDESS, 1998, pp. 149-190.

[35] Hwang S.D. and Khayat K.H. « Effect ofmix design on restrained shrinkage of self-consolidating concrete » Materials and Structures, Published on line 27 March 2009

[36] BANFILL P.F.G. « Workability of Flowing Concrete » Magazine of Concrete Research, 1980, Vol.32, No. 110, March, pp.12-27.

[37] Chapdelaine F. « Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais » Mémoire de Master (M.Sc.), 1998 Université de Laval, 126 pages.

[38] Holcim « Le béton autocompactant Recommandation » Suisse, SA, Version 26.11.2004

[39] Persson B. « A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, p. 193-198.

[40] De Larrard F. "Concrete mixture-proportioning - A scientific approach", Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.

[41] Gibbs J.C. and Zhu W. " Strength of hardened self-compacting concrete " Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.199-209.

[42] Sonebi M. and Bartos P.J.M. "Hardened SCC and its bond with reinforcement" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275-289.

[43] Petersson Ö. "Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength" Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp.277-284.

[44] Felekoglu B., Yardimci M. Y. and Baradan B. "A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete", Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp.446-456.

[45] Klug Y. and Holschemacher K. "Comparison of the hardened properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 596-605.

[46] Guneyisi E. and Gesoglu M. « A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag » Materials and Structures, 2008, vol 41, pp. 479–493.

[47] Choi Y.W., Kim Y.J., Shin H.C. and Moon H.Y. « An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1595–1602.

[48] Assié S., Escadeillas G., Marchese G. and Waller V.«Durability properties of low resistance self-compacting concrete » Magazine of Concrete Research, 2006, vol 58, pp.1–7.

[49] Nassif H.H., Najm H. and Suksawang N.« Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC » Cement & Concrete Composites, 2005, vol 27, pp. 661–670.

[50] Felekoglu B., Turkel S. and Baradan B. « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.

[51] Gram H.E. and Piiparinen P. "Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 211-225.

[52] Song H.W., Byun K.J., Kim S.H. and Choi D.H. "Early-Age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS" Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 2001, pp. 413-422.

[53] Turcry P. « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation » Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[54] Vitek J.L. "Long-Term Deformations of Self-Compacting Concrete" 3rdInternational Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 663-671.

[55] Hu C. et Barbieri B., « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 1998, pp. 265-272.

[56] Vieira M. and Bettencourt A. "Deformability of hardened SCC" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 637-644.

[57] Pons G., Proust E. and Assié S. "Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete: A different behavior compared with vibrated concrete?" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 645-654.

[58] Lee K.M., Lee H.K., Lee S.H. and Kim G.Y. « Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1279–1285.

[59] Neville A. M., " Propriétés des Bétons ", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

[60] Van B. K. and Montgomery D. “Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone” Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 227-238.

[61] Proust E. « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.

[62] Mortsell E. and Rodum E. “Mechanical and durability aspects of SCC for road structures” Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp. 459-468.

[63] Jianyong L. et Yan Y. « A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, pp. 1203–1206.

[64] Chan Y.W., Chen Y.G. et Liu Y.S.“Effect of consolidation on bond of reinforcement in Concrete of different workabilities” ACI Materials Journal, July August 2003, vol 100, pp. 294-301.

[65] Valcuende M. ET Parra C. « Bond behavior of reinforcement in self-compacting concretes » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 162–170.

[66] RILEM Technical Committee « Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete » Materials and Structures, 2008, vol 41, pp. 225–233.

[67] Persson B. « Fire resistance of self-compacting concrete, SCC » Materials and Structures, November 2004, Vol 37, pp. 575-584.

[68] Cheng A., Huang R., Wu J.K. et Chen C.H. “Influence of GGBS on durability and corrosion behaviour of reinforced concrete” Materials Chemistry and Physics, 2005, vol 93, pp. 404-411.

[69] Pal S.C., Mukherjee A. and Pathak S.R. “Corrosion behaviour of reinforcement in slag concrete” ACI Materials Journal, November-December 2002, vol 99, pp. 521-527.

[70] Yeau K.Y. et Kim E.K. « An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag» Cement and Concrete Research, 2005, vol 35, pp. 1391–1399.

[71] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. « A study on anticorrosion effect in high performance concrete by the pozzolanic reaction of slag » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 615–622.

[72] Hassan A.A.A., Hossain K.M.A. and Lachemi M. « Corrosion resistance of selfconsolidating concrete in full-scale reinforced beams » Cement & Concrete Composites, 2009, vol 31, pp. 29–38.

[73] Botte, Burdin, Zermatten, « SCC Tunnrl Applications » Cleuson Dixence Project Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 13-15 September 1999.

[74] P.L. Domone, J.Jing, « Properties of Mortar for Self Compacting Concrete », Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, September 1999, RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

[75] T. Nawa, T. Izumi, Y. Edamatsu «State- of- the-art- report on materials and design of self-compacting concrete» Proc of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, ed K. Ozawa and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998, 166-190.

[76] H.Chai, « Design and testing of SCC» Ph.D thesis, University of London, April 1998

[77] Association Française de Génie Civil, « Béton auto-plaçants Recommandations provisoires », documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.

[78] Walraven J., «Structural aspects of self-compacting concrete», Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp, 15-22, 2003

[79] Projet Région «Amélioration des constructions par l maîtrise des BAP» du conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche « l'homme et sa région », 131 p., 2005

[80] Grünewald S., Walraven J.C., «Rheological measurements on selfcompacting fibre reinforced concrete », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49 -58, 2003.

[81] Nielsson I., Wallevick O.H., «Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results», Proceedings of the Third Internationl Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68,2003.

[82] Daczko J.A., «A comparison of passing ability test methods for selfconsolidating concrete», Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 335-344, 2003.

[83] Utsi S., Emborg M., Carlswärd J., «Relation between work ability and rheological parameters», Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 154-164, 2003

[84] Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P., «Rheological Model for selfconsolidating concrete», ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre 2002. [CAL] Calcia, "Mode d'action des adjuvants",

Document Calcia.

[85] Sedran T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.

[86] RILEM "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France, 2001.

[87] Turcry P. et Loukili A. "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques" Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.

[88] Edamatsu Y., Nishida N. and Ouchi M. "A rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Selfcompacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp. 309-320.

[89] Encyclopédie Encarta ; Edition 2009

[90] NA 523-1990 : Normes Algérienne « liants hydrauliques-technique des essais, sable normal et mortier normal » IARON, Alger, 1990

[91]Cours de matériaux de construction, université de Médéa Yahia Farés

[92] Mr. Saidi Mohammed Mouloud : « Recherche d'un sable de substitution au sable normalisé de Leucate». Thèse de magistère. Juillet 2007

[93] François Bondeux – Philippe Dhervilly – Pierre Duc – Marie-Cécile Duranthon : « Quels sables pour votre golf ».

[94] Adam Neville : « Propriétés des bétons»; édition Eyrolle.

[95] NA 2607-1990 : Norme Algérienne « Analyse granulométrique par tamisage » IARON, Alger 1992

[96] NA 455-1990 : Norme Algérienne «Granulats, équivalent de sable » IARON, Alger 1990

[97] Walther, René « construire en béton", synthèse pour architectes /Walther, René : presse polytechniques universitaires romandes 1993.

[98] Roger Lacroix – Jean Luc Clément : « propriétés des bétons armés et précontraints»

[99] CEN EN 196-1 : Norme Française CENEN 196-1 « Méthode d'essais des ciments, partie I : «Détermination des résistances mécanique » AFRON, Paris, Août 1995

[100] NA 442, Normes Algérienne : « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.

[101] Fiche technique : « Sable normalisé », 2009.

[102] (C.N.E.R.I.B) Centre national d'étude et de recherche intégrés du bâtiment « Les sables de concassage », Alger ,2005.

[103] NF EN933-1« Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par Tamisage », AFNOR.

[104] 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.

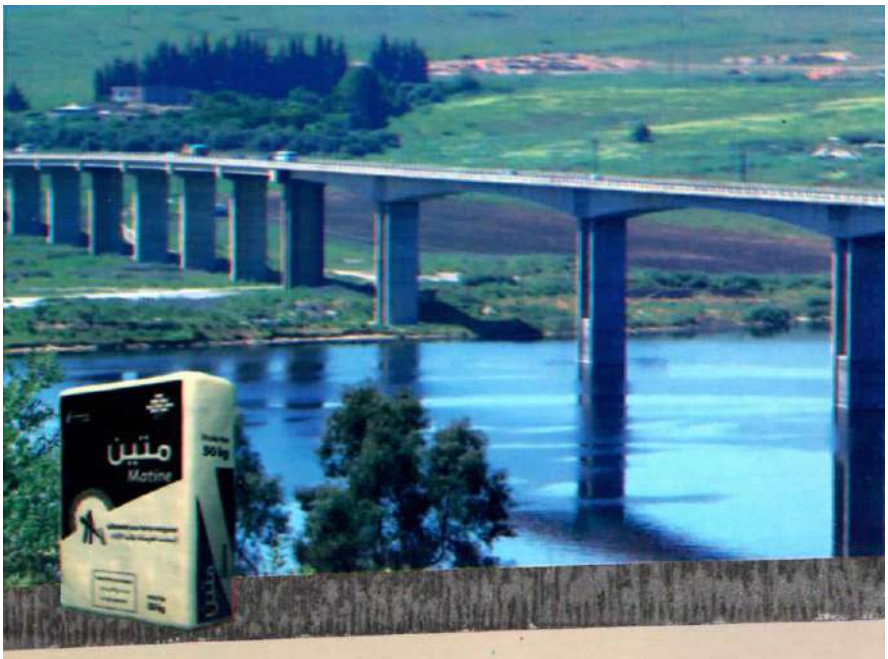
[105] NF EN 933-8« Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[106] Boukendakdji, O, " Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton auto plaçant : Optimisation des conditions opératoires ", Thèse de doctorat de l'Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2010.

[107] DUPAIN.R et all, « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » ,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.

[108] Z.E.Abib, « Formulation et Caractérisation des Bétons Autoplaçants », Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Juillet 2004.

Annexe A : FICHE TECHNIQUE DU CIMENT UTILISE (MATINE)



Ciment

MATINE

Ciment pour béton exigeant

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.

CIMENT	SABLE (sec)	GRAVILLONS (sec)	EAU (litres)
1	2	3	25 ℓ

Remarque : Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en œuvre.

10 ℓ ≈ 60 ℓ

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42.5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), **(NA 5042)**:	7.00 – 9.50
Résidus insolubles (%), **(NA 5042)**:	1.5– 3.0
Teneur en sulfates SO_3 (%), **(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 (Bogue)

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58.00 – 64.00
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6,0– 8,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine **(NA 231)**:	4300 – 4 800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	120 - 180
Fin de prise (min)	210 - 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (Mpa)	> 20
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62,5

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

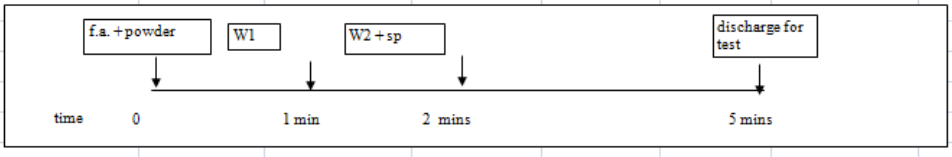
Annexe B : FICHE TECHNIQUE DU L'ADJEUVANT UTILISE (MEDAFLOW145)

Annexe C : PROGRAMME DE CALCULE LES QUANTITES EXIGENCES POUR DES MAP

Essais sur Mortier					entrer data dans cellules en rouge	
					valeurs calculées dans cellules en noir	
Référence du mélange	**Essai 1**	CEM II 42,5 sans ajout			Date	26/10/2013
volume de mortier (litres)	**1.3**					
sable/mortier vol	0.45					
E/P par vol.	1.260	poudre vol (%)	24.34	Eau volume (%)		30.66
composition Poudre(vol %)		type				
ciment portland	100					
Laitier	0					
Fumée de Silice	0					
Pouzolane	0					
superplast - MEDAFLOW30	0.6	% (Sp/P)				
humidité sable						
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)		
poids humide (gms)	200	**0.0**	0.58	**-0.6**		
poids sec (gms)	200					

Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		**poid mélange**		
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	**kg**		
ciment	0.316	3100				**0.981**		
Laitier	0.000	2857				**0.000**		
Calcaire	0.000	2544				**0.000**		
Pouzolane	0.000	2590				**0.000**		
Eau	0.399	1000	0.399			0.404	**W1**	**0.242**
			total				**W2**	**0.161**
superplast - MEDAFLOW30		1065	0.006	70	0.004	**0.0059**		
			ssd				SF	0.6218
Sable	0.585	2673	1.564	-0.584	-0.009	**1.555**	**SG**	0.9327
Total	1.300					2.945		
		w/p bt wt =	0.4065					

procédure de malaxation



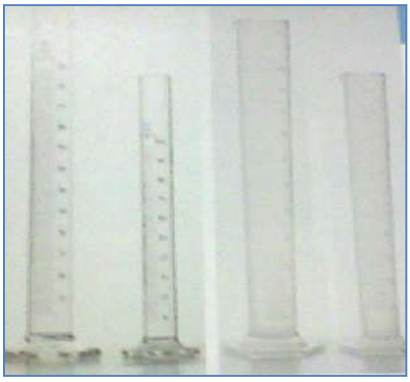
Annexe D : EQUIPEMENT SECONDAIRE

-Les balances -





-Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées-







-Spatules flexibles en acier inox-

-Pinceaux-





Annexe E : LES ETAPES DE FABRICATION DES EPROUVETTES DE MORTIER

Lors du malaxage



Après le malaxage



Résultats du diamètre d'étalement pour l'ensemble des mortiers à base du sable normalisé



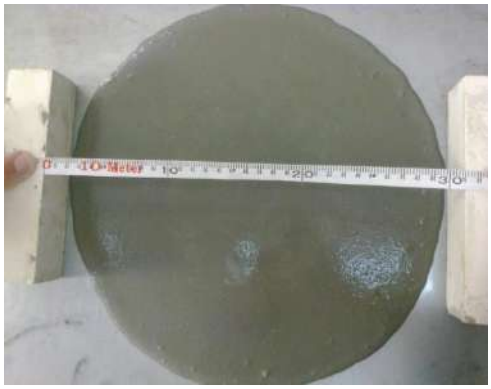
Dosage 0.6%



Dosage 1%



Dosage 1.6%



Dosage 2%

Résultats du diamètre d'étalement pour l'ensemble des mortiers à base du sable concassé (Mont Gorno)



Dosage 0.6%



Dosage 0.8%



Dosage 1.2%



Dosage 1.4%

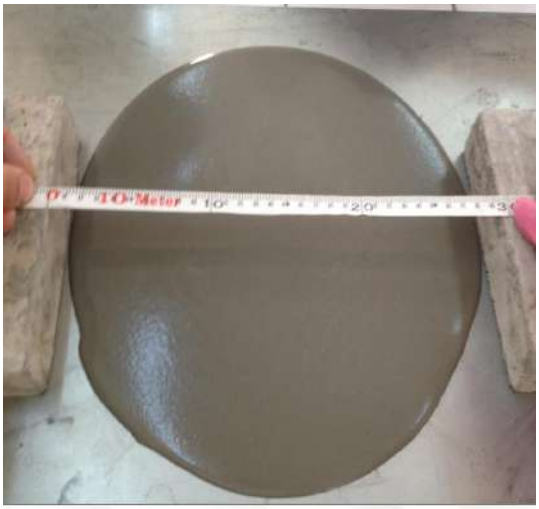


Blocage de mortier

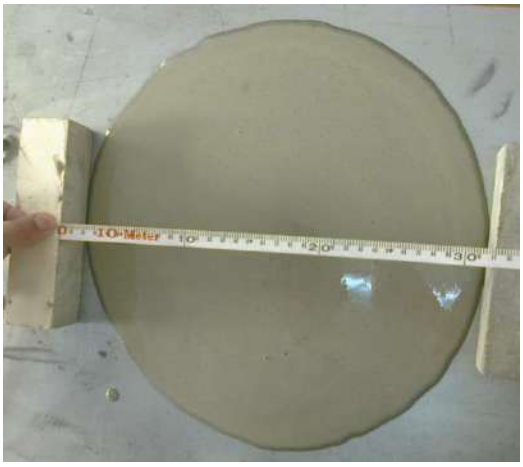
Résultats du diamètre d'étalement pour l'ensemble des mortiers à base du sable Sidi Bayazid



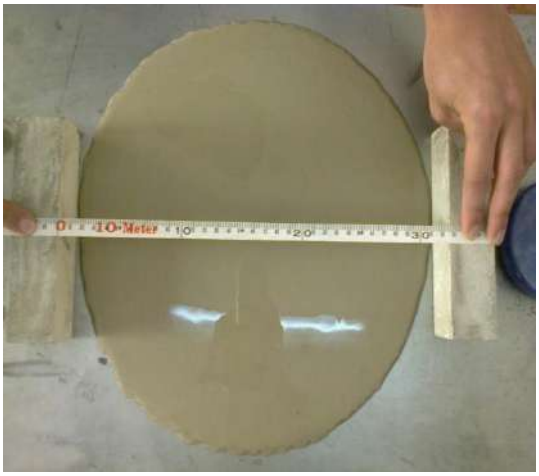
Dosage 0.6%



Dosage 1%



Dosage 1.4%

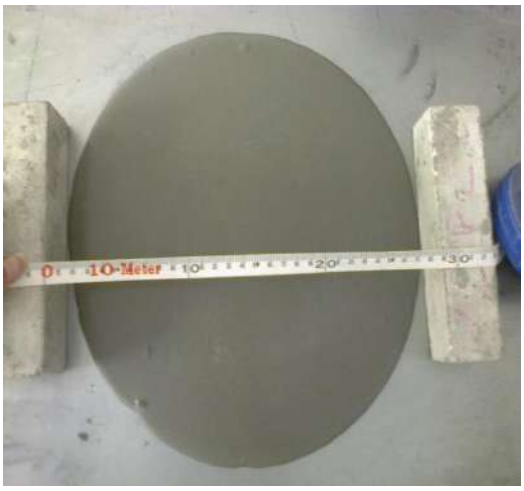


Dosage 1.6%

Résultats du diamètre d'étalement pour l'ensemble des mortiers à base du sable boughzoul



Dosage 0.6%



Dosage 1%



Dosage 1.4%

Résultats du diamètre d'étalement pour l'ensemble des mortiers à base du sable hassi bahbah



Dosage 0.6%



Dosage 1.6%



Dosage 1.8%

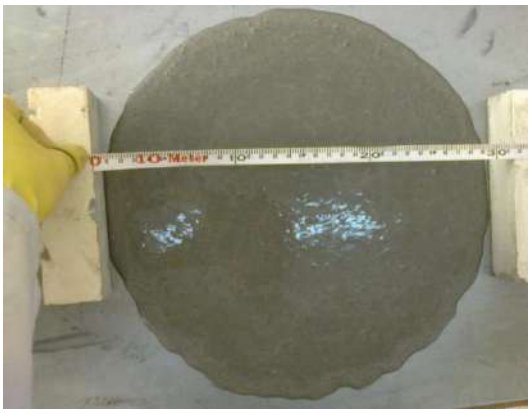


Dosage 2%

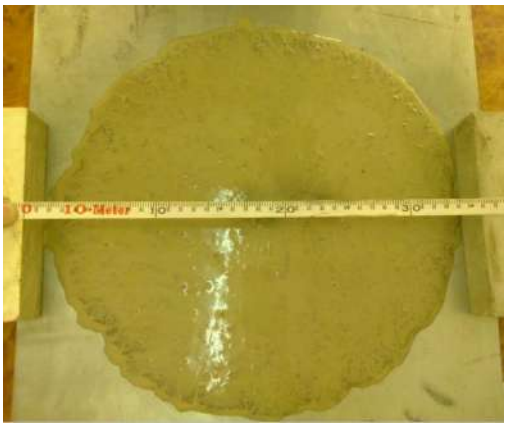
Résultats du diamètre d'étalement pour l'ensemble des mortiers à base du sable Corrigé



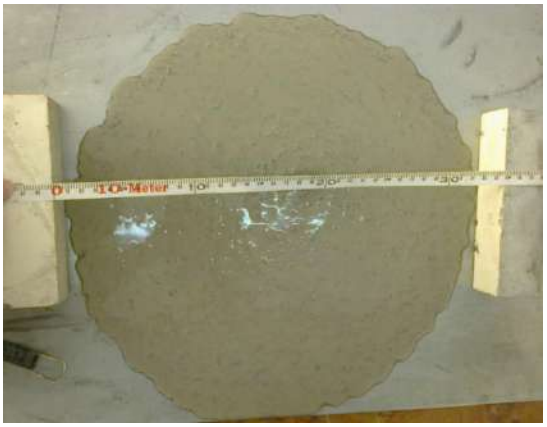
Dosage 0.6%



Dosage1%



Dosage 1.4%



Dosage 1.6%

Après le coulage du moule





Les éprouvettes de mortier après 7 jours de conservation

Les éprouvettes de mortier après 28 jours de conservation



