

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté d'Architecture et de Génie Civil
Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Génie Civil
Spécialité : Géomatériaux

Par
BOUNEDJEMA Yassine

Thème :

*Evaluation des modifications mécaniques Et rhéologiques
apportées par le sable de concassage aux mortiers et bétons*

Soutenu(e) le **17/04/2017**, devant le jury composé de :

KASSOUL Amar	Professeur	UHB Chlef	Président
EZZIANE Karim	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
HALLAL Ahmed	MCB	UHB Chlef	Co-Rapporteur
KENAI Said	Professeur	USD Blida	Examineur
MENADIBelkacem	Professeur	USD Blida	Examineur
GHRICI Mohamed	Professeur	UHB Chlef	Examineur



De droite à gauche

*Pr Menadi Belkacem, Pr Ezziane Karim, Pr Kenai Said , Bounedjema Yassine, Pr
Kassoul Amar, Pr Ghrici Mohamed, Dr Hallal Ahmed*

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse qui a été menée au sein du laboratoire géomatériaux (LaG) de l'université Hassiba Benbouali de Chlef.

*De prime, je tiens à remercier les personnes qui étaient au premier rang pour l'encadrement et le suivi de cette recherche, à savoir mon directeur de thèse Monsieur **Karim Ezziane**, Professeur à la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de Chlef, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail dans les meilleures conditions ; de part de ses conseils scientifiques, de sa grande disponibilité, de ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.*

*Je remercie vivement mon co-encadreur de thèse Monsieur **Ahmed Hallal**, Maître de conférences à l'Université de Chlef, pour son aide dans la préparation de ce travail.*

J'adresse aussi mes remerciements à chacun des membres du jury :

*Monsieur **Kassoul Amar** professeur à l'Université de chlef, qui a accepté de présider ce Jury ; de même monsieur **Kenai Said**; professeur à l'Université de Blida, monsieur **Menadi Belkacem** ; professeur à l'Université de Blida, monsieur **Ghrici Mohamed**; professeur à l'Université de chlef, qui ont accepté d'examiner ce travail.*

*Mes remerciements vont également à mes collègues de la faculté de Génie Civil et d'Architecture de Chlef, du Laboratoire Géomatériaux (LaG) et du Laboratoire du béton en Génie Civil, que ce soit enseignants, chercheurs, techniciens et personnels administratifs avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. J'en profite aussi pour remercier Monsieur **Adjoudj M'hamed** pour ses conseils et son aide dans la réalisation de la partie expérimentale.*

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs, ma femme et mon enfant qui m'ont soutenu pendant l'élaboration de ce travail.

Y. Bounedjema

ملخص

في الجزائر، كثرة تشييد المباني وأعمال الهندسة المدنية أدت إلى زيادة كبيرة في استهلاك الرمال الطبيعية. الإفراط في استهلاك هذه الرمال تسبب في مشاكل اقتصادية و بيئية تحتم على البحث عن بديل. الرمال المسحوقة تأهل كبديل مناسب للرمال الطبيعية. هذا العمل يدرس تأثير الاستبدال الجزئي أو الكلي للرمال الطبيعية بالرمال المسحوقة في مزيج الخرسانة. لهذا قمنا بصناعة خليط الخرسانة من مختلف نسب الاستبدال؛ 0، 20، 40، 60، 80 و 100٪ مع ثلاث نسب مختلفة من الماء. تتكون الاختبارات في تحديد متطلبات الملدن لتكوين خرسانة في حالة بلاستيكية على أساس المحتوى من الرمال المسحوقة. يركز التقييم على القابلية، القوة الميكانيكية والخصائص الريولوجية. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الرمال المسحوقة لها تأثير كبير على خصائص الخرسانة، وجودها يزيد من القوة الميكانيكية، يقلل من الخصائص الريولوجية ويقلل من تركيز الملدن حتى مع انخفاض نسبة الماء. أيضا من أجل تشكيل خرسانة بنسبة قليلة من الماء فإنه من المفيد استخدام بدائل جزئية من سحق الرمال من اللجوء إلى استخدام جرعات مفرطة من الملدن.

كلمات البحث: الاسمنت، الرمال المسحوقة، قوة ضاغطة الخرسانة الخواص الريولوجية ، اللزوجة، الملدنات، قابلية، عتبة القص.

Résumé

En Algérie, Le développement dans la construction des bâtiments et des ouvrages en génie civil a provoqué un accroissement considérable dans la consommation des sables naturels. Cette consommation excessive engendre des problèmes économiques et environnementaux ce qui a conduit à chercher des alternatifs. Le sable de concassage se profile comme substitut approprié pour le sable naturel. Ce travail étudie les performances du sable concassage (CS), lorsqu'il remplace partiellement ou complètement le sable naturel (NS) dans le mélange du mortier. Pour cela, des mélanges de mortiers ont été confectionné à différents taux de remplacement ; 0, 20, 40, 60,80 et 100%, avec trois rapports E/C. Les essais consistent à déterminer l'exigence en superplastifiant pour avoir une consistance plastique du mortier en fonction du contenu du sable de concassage. L'évaluation porte sur l'ouvrabilité, les résistances mécaniques et les propriétés rhéologiques. Les résultats obtenus montrent que le sable de concassage a un grand effet sur les propriétés de mortier. Sa présence augmente la résistance mécanique, diminue les paramètres rhéologiques et réduit le dosage en superplastifiant, même avec un faible rapport E/C. Ainsi pour confectionner un mortier avec de faibles rapports E/C, il est intéressant d'utiliser des remplacements partiels en sable de concassage que de recourir à l'utilisation de dosages excessifs en superplastifiant.

Mots-clés: *Ciment, Sable de concassage, Résistance à la compression, Mortier, Rhéologie, Viscosité, Superplastifiants, Ouvrabilité, Seuil de cisaillement.*

Abstract

In Algeria, the development in construction of buildings and civil engineering works caused a considerable increase in the consumption of natural sands. These excessive consumption cause economic and environmental problems which led to seek other alternatives. Crushed sand qualifies as a suitable substitute for natural sand. This work studies the performance of crushed sand (CS), when partially or completely replaced natural sand (NS) in the mix mortar. For this, we have constructed mixtures of different mortars with replacement rate of 0, 20, 40, 60, 80 and 100% and with three W/C ratios. The tests consist of determining the superplasticizer requirement to have a plastic consistency of mortar according to the CS content. The evaluation focuses on the workability, mechanical strength and rheological properties. The results obtained show that the crushed sand has a great effect on the mortar properties. Their presence increases the mechanical strength, decreases the rheological parameters and reduces the dosage of superplasticizer even with a low W / C. Thus, in order to make a mortar with low E / C ratios, it is advantageous to use partial replacements in crushed sand rather than using excessive quantities of superplasticizer.

Keywords: *Cement, Crushed sand, Compressive strength, Mortar, Rheology, Viscosity Superplasticizer, Workability, Yield stress.*

Liste des figures

Figure 1.1 :	<i>Présentation des différents types de granulats</i>	22
Figure 1.2 :	<i>Les différentes dimensions des granulats</i>	23
Figure 1.3 :	<i>Forme du granulat</i>	24
Figure 1.4 :	<i>Schéma de la contrainte de cisaillement</i>	28
Figure 1.5 :	<i>Schéma de vitesse de cisaillement</i>	29
Figure 1.6 :	<i>Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [29]</i>	30
Figure 1.7 :	<i>Schéma de glissement des couches</i>	31
Figure 1.8 :	<i>Rhéomètre Two-point-test [30]</i>	32
Figure 1.9 :	<i>Rhéomètre à béton IBB [26]</i>	32
Figure 1.10 :	<i>Rhéomètre BML</i>	33
Figure 1.11 :	<i>Rhéomètre à béton du Cemagref</i>	33
Figure 1.12 :	<i>Rhéomètre à béton BT Rhéom</i>	34
Figure 1.13 :	<i>Influences de rapport E/C sur l'affaissement du béton pour différent type des granulats [42]</i>	38
Figure 1.14 :	<i>Variation de seuil de cisaillement et viscosité plastique pour différent granulats fins [44]</i>	39
Figure 1.15 :	<i>Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons confectionnés avec différents granulats (E/C=0,50) [38]</i>	39
Figure 1.16 :	<i>Relation entre la résistance à la compression du béton et la résistance à la compression du granulat [51]</i>	41
Figure 1.17 :	<i>Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [38]</i>	41
Figure 2.1 :	<i>Production du sable concassé (m3) année 2009 (10 wilayas les plus productrices) [63]</i>	49
Figure 2.2 :	<i>L'étalement et le temps d'écoulements du mortier en fonction de taux des fines calcaires [72]</i>	51
Figure 2.3 :	<i>Variation du rapport E/C avec le pourcentage de fines calcaires [69]</i> ..	51
Figure 2.4 :	<i>Résistance à la compression (3, 7 et 28 jours) du mortier composé avec différents taux de fines calcaires [70]</i>	54
Figure 2.5 :	<i>Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers [96]</i>	55
Figure 2.6 :	<i>Variation de la résistance à la traction des bétons pour différents affaissement [96]</i>	56
Figure 2.7 :	<i>L'influence de taux de remplacement de filler calcaire sur la résistance à la traction du béton [97]</i>	56
Figure 2.8 :	<i>Evolution du module de Young des mortiers élaborés en fonction du taux de fillers [98]</i>	57
Figure 2.9 :	<i>Retrait des mortiers avec fines en fonction de l'âge [71]</i>	58
Figure 2.10 :	<i>Charge totale passant pour mélanges de béton contenant diverses quantités des fines calcaires à 90 jours [101]</i>	59
Figure 2.11 :	<i>Les valeurs des coefficients de perméabilité pour différents mélanges de béton contenant diverses quantités des fines calcaires à 90 jours</i>	59
Figure 2.12 :	<i>Evolution de la densité en fonction du taux de fillers [77]</i>	60
Figure 2.13 :	<i>Evolution de la porosité de mortier en fonction du taux de fillers [77]</i> ..	61
Figure 2.14 :	<i>Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment calcaire avec le sable normalisé et le sable concassé. [60]</i>	62
Figure 2.15 :	<i>L'ouvrabilité des mortiers en fonction de rapport E/C [107]</i>	63
Figure 2.16 :	<i>Teste de compression de maçonneries [107]</i>	64
Figure 2.17 :	<i>Étalement au cône d'Abrams des BAP [116]</i>	65

Figure 2.18:	<i>Variation d'affaissement du béton avec de la poussière de la carrière. [118]</i>	66
Figure 2.19 :	<i>Étalement et le contenu de superplastifiant dans le béton avec un rapport de mélange de sable concassé [125]</i>	67
Figure 2.20:	<i>L'ouvrabilité du mortier avec différents taux des substitutions [72]</i>	68
Figure 2.21:	<i>Viscosité du mortier auto-plaçant avec différent taux de remplacement</i>	68
Figure 2.22:	<i>Résistance de compression de béton à haute performance à l'âge de 28 jours on fonction de proportion de sable artificiel [129]</i>	69
Figure 2.23 :	<i>Résistances de compression des BAP retenus et des BO témoins [116].</i>	70
Figure 2.24 :	<i>Résistance à la compression des bétons [120]</i>	71
Figure 2.25:	<i>Variation de résistance à la compression du béton avec dévers taux de pierre calcaire concassé [133]</i>	71
Figure 2.26:	<i>Résistance de compression de béton a 180 jours [136]</i>	73
Figure 2.27:	<i>Densité du béton de différents taux de poussières [118].</i>	75
Figure 2.28:	<i>Coefficient de perméabilité des BAP [116]</i>	75
Figure 2.29:	<i>Coefficient d'absorption par capillarité des BAP [116]</i>	76
Figure 2.30:	<i>Variation de la résistance à la compression du béton en immersion avec des solutions différentes pour le mélange de 50% de la poussière de la carrière [118]</i>	77
Figure 3.1 :	<i>Courbes granulométriques des sables</i>	82
Figure 3.2 :	<i>Texture de la surface du sable naturel et concassé</i>	82
Figure 3.3:	<i>Essai d'étalement pour mortier</i>	84
Figure 3.4:	<i>Les démarches de l'essai d'ouvrabilité par la table à secousse</i>	85
Figure 3.5:	<i>rhéomètre a mortier</i>	87
Figure 3.6:	<i>Les composants d'un rhéomètre</i>	87
Figure 3.7:	<i>Schéma descriptif du rhéomètre à mortier</i>	88
Figure 3.8:	<i>Profil de vitesse [140]</i>	89
Figure 3.9:	<i>Linéarisation des moments finaux en fonction de la vitesse de rotation</i>	91
Figure 3.10:	<i>Variation de la contrainte de cisaillement et fonction de la vitesse de cisaillement. 60% SC, 40% SN</i>	94
Figure 3.11 :	<i>Répétitivité des résultats de seuil de cisaillement d'un mortier</i>	95
Figure 3.12 :	<i>Répétitivité des résultats de la viscosité plastique d'un mortier</i>	95
Figure 3.13:	<i>Table vibrante pour mortier</i>	96
Figure 3.14:	<i>Machine de flexion trois points pour éprouvettes prismatiques de mortiers 40 x 40 x160 mm</i>	97
Figure 3.15 :	<i>Principe de l'essai par flexion</i>	97
Figure 3.16 :	<i>Presse de compression</i>	99
Figure 3.17:	<i>Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme</i>	99
Figure 4.1 :	<i>Variation d'ouvrabilité du mortier (étalement %) en fonction du taux de substitution de SN par SC</i>	104
Figure 4.2 :	<i>Variation du besoin de rapport E/C en fonction du taux de substitution de SN par SC pour un étalement de 80%</i>	105
Figure 4.3 :	<i>Étalement des mortiers en fonction du dosage de superplastifiant avec E/C = 0,4</i>	109
Figure 4.4 :	<i>Étalement des mortiers en fonction du dosage de superplastifiant avec E/C = 0,5</i>	109
Figure 4.5 :	<i>Étalement des mortiers en fonction du dosage de superplastifiant avec E/C = 0,6</i>	110
Figure 4.6 :	<i>Variation du dosage en superplastifiant en fonction du taux du sable de concassage et rapport E/C avec ouvrabilité fixe</i>	111

Figure 4.7 :	<i>Variation du seuil de cisaillement des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour divers rapports E/C.....</i>	113
Figure 4.8 :	<i>Variation du Viscosité plastique des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour divers rapports E/C.....</i>	113
Figure 4.9 :	<i>Relation entre les valeurs calculés et mesurées du seuil de cisaillement des mortiers avec divers mélanges testés.....</i>	115
Figure 4.10 :	<i>Relation entre les valeurs calculés et mesurées de la viscosité plastique des mortiers avec divers mélanges testés.....</i>	115
Figure 4.11 :	<i>Seuil de cisaillement des mortiers avec deux sables en fonction de dosage en superplastifiant.....</i>	116
Figure 4.12 :	<i>Viscosité plastique des mortiers avec deux sables en fonction de dosage en superplastifiant.....</i>	117
Figure 4.13 :	<i>Seuil de cisaillement des mortiers avec et sans superplastifiant en fonction de taux de substitution du sable naturel.....</i>	118
Figure 4.14 :	<i>Viscosité plastique des mortiers avec et sans superplastifiant en fonction de taux de substitution du sable naturel.....</i>	118
Figure 5.1:	<i>Résistance à la compression des mortiers en fonction de le taux de substitution de SN par SC avec $E / C = 0,4$.....</i>	126
Figure 5.2 :	<i>Résistance à la compression des mortiers en fonction de le taux de substitution de SN par SC avec $E / C = 0,5$.....</i>	127
Figure 5.3:	<i>Résistance à la compression des mortiers en fonction de le taux de substitution de SN par SC avec $E / C = 0,6$.....</i>	127
Figure 5.4:	<i>Résistance à la compression du mortier à l'âge de 28 jours en fonction du taux de substitution de SN par SC pour divers rapports E/C.....</i>	128
Figure 5.5:	<i>Relation entre la résistance à la compression mesurée et calculé des mortiers à l'équation 4.6 pour divers mélange utilisé.....</i>	129
Figure 5.6:	<i>Relation entre la résistance à la compression mesurée et calculé des mortiers à l'équation 4.7 pour divers mélange utilisé.....</i>	130
Figure 5.7:	<i>Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction de le taux de substitution de SN par SC avec $E/C = 0,4$.....</i>	132
Figure 5.8:	<i>Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction de le taux de substitution de SN par SC avec $E/C = 0,5$.....</i>	132
Figure 5.9:	<i>Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction de le taux de substitution de SN par SC avec $E/C = 0,6$.....</i>	134
Figure 5.10 :	<i>Relation entre la résistance à la traction par flexion mesurée et calculé des mortiers à l'équation 4.8 pour divers mélange utilisé.....</i>	135
Figure 5.11:	<i>Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction</i>	136

Liste des tableaux

Tableau 1.1 :	<i>Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.....</i>	24
Tableau 2.1 :	<i>Résultats des propriétés rhéologiques des différents mélanges du mortier [89].....</i>	53
Tableau 2.2 :	<i>Résistance à la compression pour un affaissement A=9 [113].....</i>	65
Tableau 2.3 :	<i>Résistance à la compression de béton avec différents pourcentage de poussière de carrière [135].....</i>	72
Tableau 2.4 :	<i>Module d'élasticité des bétons [118].....</i>	74
Tableau 3.1 :	<i>Composition chimique et minéralogiques du ciment de chlef.....</i>	81
Tableau 3.2 :	<i>Caractéristiques des deux sables utilisés.....</i>	82
Tableau 3.3 :	<i>Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant</i>	83
Tableau 3.4 :	<i>Proportions du mélange des mortiers.....</i>	83
Tableau 3.5 :	<i>Procédure de malaxage et mode d'introduction de l'adjuvant.....</i>	84
Tableau 3.6 :	<i>Proportions du mélange des mortiers avec E/C=0.4.....</i>	86
Tableau 3.7 :	<i>Proportions du mélange des mortiers avec E/C=0.5.....</i>	86
Tableau 3.8 :	<i>Proportions du mélange des mortiers avec E/C=0.6.....</i>	86
Tableau 3.9 :	<i>Proportions du mélange des mortiers pour un étalement de 80%.....</i>	88
Tableau 3.10 :	<i>Calcul du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour un mortier contenant 60% SC et 40% SN.....</i>	93
Tableau 3.11 :	<i>Formulation des différents mélanges des mortiers avec E/C=0.4.....</i>	100
Tableau 3.12 :	<i>Formulation des différents mélanges des mortiers avec E/C=0.5.....</i>	100
Tableau 3.13 :	<i>Formulation des différents mélanges des mortiers avec E/C=0.6.....</i>	100
Tableau 4.1 :	<i>Etalement de mortier avec différents proportion en fonction de pourcentage de superplastifiant avec E/C=0.4.....</i>	106
Tableau 4.2 :	<i>Etalement de mortier avec différents proportion en fonction de pourcentage de superplastifiant avec E/C=0.5.....</i>	107
Tableau 4.3 :	<i>Etalement de mortier avec différents proportion en fonction de pourcentage de superplastifiant avec E/C=0.6.....</i>	108
Tableau 4.4 :	<i>Les paramètres rhéologiques des mortiers en fonction du taux de sable de concassage et du rapport E/C.....</i>	112
Tableau 5.1 :	<i>Résultats des essais de résistance à la compression des mortiers à base du sable de concassage.....</i>	125
Tableau 5.2 :	<i>Résultats des essais de résistance à la flexion des mortiers à base du sable de concassage</i>	133

Liste des symboles

dF	Projection de la force de frottement tangentielle.
dS	Surface élémentaire d'une couche cisailée.
τ	Contrainte de cisaillement [Pa].
τ_0	Seuil de cisaillement [Pa].
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement [1/s].
μ :	Viscosité plastique [Pa.s].
A	L'affaissement du béton [mm].
G/S	Rapport de gravier sur sable
BCS	Béton calcaire avec superplastifié
BCNS)	Béton calcaire sans superplastifié
C	Dosage en ciment
C-H	Chaux hydraté
E	Dosage en eau
E/C	Rapport eau sur ciment
Sp	Teneur en superplastifiant.
CaO	Oxyde de calcium
SiO ₂	Silice
Al ₂ O ₃	Alumine
Fe ₂ O ₃	Oxide de fer
MgO	Oxyde magnesium
Na ₂ O	Oxide de sodium
K ₂ O	Oxide de potassium
SO ₃	Trioxide de soufre
C ₃ S	Silicate tricalcique (Aalite)
C ₂ S	Silicate bicalcique (bélite)
C ₃ A	Aluminate tricalcique (célite)
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CPA	Ciment portland sans ajout
CSH	Silicates de calcium hydratés
t	L'âge de mortiers en jours
p	Représente le taux de remplacement du SN par SC
K _f	Le coefficient selon le squelette granulaire et la classe de ciment à l'âge donné.
d _c	La masse volumique du ciment
R ²	Coefficient de corrélation
R _t	Résistance à la traction
R _c	Résistance à la compression
<i>E_{tal}</i>	Etalement [mm]
y	Un coefficient qui dépend de la consistance du mortier
Mg SO ₄	Sulfate de magnésiums
NaCl	Chlorure de sodium
HCl	D'acide chlorhydrique
SC	Sable de concassage
SN	Sable naturel
SS	Sable siliceux
BO	Béton ordinaire
BAP	Béton auto plaçant
BHP	Béton à hautes performances

Table des Matières

ملخص.....	4
Résumé.....	5
Abstract	6
Liste des figures	7
Liste des tableaux.....	10
Liste des symboles	11
Introduction Générale	16

Chapitre 01 *Granulats et béton*

1.1. Introduction.....	20
1.2. Granulats	20
1.2.1. Différents types de granulats.....	21
1.2.1.1. Granulats Naturels.....	21
1.2.1.2. Granulats Artificiels.....	21
1.2.1.3. Granulats Recyclés.....	21
1.2.2. Caractéristiques des granulats.....	22
1.2.2.1. Caractéristiques de fabrication.....	22
1.2.2.2. Caractéristiques physiques	25
1.2.2.3. Caractéristiques mécaniques	26
1.3. Béton	26
1.3.1. Compositions du béton.....	27
1.3.2. Propriétés des bétons.....	27
1.3.2.1. Ouvrabilité	27
1.3.2.2. Rhéologie	27
1.3.2.3. Retrait.....	34
1.3.2.4. Compacité et porosité.....	34
1.3.2.5. Perméabilité	35
1.3.2.6. Résistance mécanique	35
1.3.2.7. Durabilité	36
1.4. Influence des granulats sur les propriétés des bétons	36
1.4.1. Propriétés à l'état frais	37
1.4.1.1. Influence des granulats sur l'ouvrabilité.....	37
1.4.1.2. Influence des granulats sur les paramètres rhéologiques	38
1.4.2. Propriétés à l'état durcis.....	39
1.4.2.1. Influence des granulats sur la résistance mécanique.....	39
1.4.2.2. Influence des granulats sur le module d'élasticité	42
1.4.2.3. Influence de granulat sur le retrait	43

1.4.2.4. Influence sur la perméabilité des bétons	43
1.4.2.5. Influence sur l'absorption d'eau des bétons	43
1.5. Conclusion	44

Chapitre 02

Utilisation du sable de concassage dans le béton et mortier

2.1. Introduction.....	47
2.2. Production du sable de concassage en Algérie	47
2.3. Effet des fines calcaires du sable de concassage	49
2.3.1. Ouvrabilité	50
2.3.2. Paramètres rhéologiques	52
2.3.3. Résistance à la compression	53
2.3.4. Résistance à la traction par flexion	55
2.3.5. Module d'élasticité	57
2.3.6. Retrait.....	57
2.3.7. Durabilité	58
2.3.8. Pourcentage de l'air occlus	59
2.3.9. Densité réelle	59
2.4. Travaux sur le sable de concassage	61
2.4.1. Travaux sur le mortier.....	61
2.4.2. Travaux sur le béton	64
2.5. Effets de substitution du sable naturel par le sable de concassage	65
2.5.1. Ouvrabilité	65
2.5.2. Résistance à la compression	69
2.5.3. Résistance à la traction	73
2.5.4. Résistance à la flexion	73
2.5.5. Module d'élasticité	74
2.5.6. Densité	74
2.5.7. Durabilité	75
2.6. Conclusion	77

Chapitre 03

Etude expérimentale

3.1 Introduction.....	80
3.2. Programme expérimental	80
3.3. Matériaux et procédés de fabrication.....	81

3.3.1. Ciment.....	81
3.3.2. Sable.....	81
3.3.3. Adjuvant.....	83
3.3.4. Eau de Gâchage.....	83
3.4. Formulation et Confection des éprouvettes	83
3.4.1. Formulation des mortiers	83
3.4.2. Préparation des échantillons.....	84
3.5. Essais effectués	85
3.5.1. Essai d'ouvrabilité.....	85
3.5.2. Essai de la rhéologie	86
3.5.2.1. Rhéomètre utilisé	86
3.5.2.2. Démarche d'essai:	89
3.5.2.3. Profil de vitesse imposée:	89
3.5.2.4. Déroulement de l'essai.....	90
3.5.2.5. Exploitation des mesures rhéologiques.....	90
3.5.2.6. Répétitivité des essais	94
3.5.3. Essai de Résistance mécanique	96
3.5.3.1. Résistance à la traction par flexion.....	96
3.5.3.2. Résistance à la compression.....	98
3.6. Conclusion	101

Chapitre 04

Ouvrabilité et rhéologie des mortiers à base de sable de concassage

4.1. Introduction.....	103
4.2. Ouvrabilité	103
4.2.1. Effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité.....	103
4.2.2. Effet du sable de concassage sur le besoin en eau	104
4.2.3. Effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité avec superplastifiant.....	105
4.2.4. Effet du sable de concassage sur le besoin en superplastifiant	110
4.3. Rhéologie des mortiers.....	112
4.3.1. Effet du sable de concassage sur les paramètres rhéologiques	112
4.3.2. Effet de dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques des mortiers	116
4.3.3. Besoin en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques des mortiers.....	117
4.4. Discussion des résultats	118
4.5. Conclusion	121

Chapitre 05

Les propriétés mécaniques des mortiers à base de sable de concassage

5.1. Introduction.....	124
5.2. Résistance à la compression	124
5.3. Prédiction de la résistance à la compression.....	128
5.4. Discussion du modèle	130
5.5. Résistance à la traction par flexion	131
5.6. Prédiction de la résistance à la flexion.....	134
5.7 Corrélation entre les résistances à la compression et à la traction par flexion	135
5.8. Discussion des résultats	136
5.9 Conclusion	138
Conclusions Générales.....	140
Recommandations.....	142
Références bibliographies.....	144

Introduction Générale

L'augmentation rapide des activités de la construction au cours des dernières décennies a causé une augmentation considérable de la consommation des granulats naturels pour la fabrication des bétons. Par conséquent, la disponibilité de bons granulats naturels se raréfie à cause de la surexploitation et de l'épuisement des réserves naturelles. En outre, l'extraction des granulats naturels a des effets néfastes sur l'environnement, et donc il est important de réduire leur consommation ainsi que de trouver des sources alternatives. Dans certains pays, l'exploitation des sables de rivière est limitée voire interdite pour protéger les lits des rivières contre l'érosion et de leur faire jouer leur rôle principal de filtre pour les eaux souterraines. Cela a encouragé les chercheurs à étudier et identifier certains sous-produits qui peuvent être utilisés comme substituant aux granulats naturels dans la production des bétons et mortiers [1].

Les déchets de concassage du calcaire sont estimés à 21.2 millions de tonnes au Royaume-Uni, 18 millions de tonnes en Grèce et 30 millions de tonnes en Turquie. En Algérie, il existe 1010 unités de production de granulats. La production de chaque carrière est de 10 à 400 tonnes/heures, avec une production annuelle totale de 68 millions de tonnes; 33% de cette production est destinée pour le domaine routier, 47% pour les constructions et 20% (soit 15 millions de tonnes du sable concassé) sont des sables rejetés à cause de leur forte teneur en fines car ils sont non-conformes aux règlements en vigueur. Sachant que la demande annuelle en sable est de l'ordre de 25 millions de tonnes, les 15 millions de tonnes de sable rejetés constituent environ 55% de la demande en sable. Ces derniers sont généralement mis en dépôt afin qu'ils soient éventuellement vendus à très bas prix. Il n'en demeure pas moins que ce stockage agit négativement sur eux car il constitue un risque de contamination par l'air ou par les ressources d'eau [2, 3]. Pour cette raison l'utilisation du sable de concassage pour la fabrication du béton s'avère de plus en plus une nécessité pour protéger l'environnement et de répondre aux besoins du secteur de la construction et des travaux publics, du moment qu'ils existent des millions de tonnes de sable de concassage inexploités.

Le sable de concassage est un sous-produit issu du processus des carrières, contenant généralement des particules plus anguleuses avec des textures de surface rugueuses et le visage plus plat que le sable naturel qui est plus arrondi. Au fil du temps, certaines enquêtes sont montrées que les particules angulaires avec une surface rugueuse du sable de concassage influent sur l'ouvrabilité et la capacité du béton frais. Le sable de concassage doit satisfaire des requis techniques telles que l'ouvrabilité, la résistance mécanique et la durabilité du béton. Donc, il est devenu impératif d'étudier ces propriétés afin de vérifier l'adéquation et le niveau de remplacement approprié du sable concassé pour la production des bétons économiques [4] et [5].

En raison de son taux élevé de particules fines ($<80\mu\text{m}$), l'utilisation du sable de concassage, dans la confection des bétons, est limitée à la construction des chaussées ce qui cause, alors, un grave problème de stockage. Beaucoup de pays comme la France, l'Espagne, l'Angleterre, l'Argentine et le Maroc ont connu une pénurie de sable naturel et une abondance dans le sable concassé qui a engendré la modification de leurs normes respectives pour faire accepter des sables avec 12% à 16% de fines. Il existe des normes en vigueur qui limitent ce pourcentage à 7% comme la norme ASTM C33 (U.S.A) à 4% comme la norme Allemande DI4226 voire 5% comme la norme CSA A231 (Canada), la norme UNI 63 (Italie) et la norme NB589-102 (Belgique). D'autre part, certaines normes acceptent un taux de particules fines de 16% comme la norme BS 822 (Angleterre) et de 12-18% comme la norme Française, NF P 18 541, 18 301, XP 18 540.

Cette étude consiste à étudier la possibilité d'introduire le sable de concassage dans le mortier comme substituant au sable naturel. L'évaluation des modifications apportées par la présence de ce sable est assurée par des essais expérimentaux en comparaison avec le sable naturel. Les essais d'évaluation portent sur les résistances mécaniques, l'ouvrabilité et la rhéologie. Une correction des pertes de performances est envisagée par l'ajout de l'eau de gâchage et le dosage en superplastifiant.

Dès lors, le travail s'organise autour des chapitres suivants:

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les granulats utilisés dans le béton: un rappel sur les différents types de granulats et un aperçu général sur les caractéristiques des granulats (intrinsèques, physiques et mécaniques), sur l'ensemble des

propriétés physico-mécaniques et chimiques du béton et sur l'effet des différents granulats sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

Ensuite, on présente dans le deuxième chapitre, une synthèse des travaux dédiés à l'effet des fillers calcaires introduits dans le sable de concassage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton et du mortier. De plus, on propose une récapitulation des différents travaux concernant l'effet de l'utilisation du sable de concassage sur les propriétés du béton et du mortier.

Dans le troisième chapitre, le programme expérimental mis en place pour mesurer les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers contenant différents taux du sable du concassage, tel que l'étalement, le seuil de cisaillement, la viscosité plastique, les résistances mécaniques, est, dûment, détaillé à savoir les matériaux et les appareillages utilisés, un aperçu sur les techniques expérimentales ainsi que la préparation des mélanges et les variables à étudier.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus qui montrent clairement l'effet bénéfique d'introduire le sable de concassage dans le mortier, du point de vue propriétés rhéologiques, comparativement aux résultats de la littérature.

Le dernier chapitre présente les résultats de la campagne expérimentale sur l'évaluation des propriétés mécaniques (la résistance à la compression et celle à la flexion) d'un mortier contenant différents taux de sable du concassage. Une corrélation de ces propriétés a été menée pour appuyer l'analyse et la discussion de ces résultats.

Enfin, une conclusion générale et des recommandations sont présentées afin de mettre en évidence le fruit de cette recherche et exposer les éventuels axes pour des travaux futurs.

Chapitre 01

Granulats et béton

1.1. Introduction

Les granulats sont des fragments de roches naturelles dont la taille varie de 0 à 125 mm, tels que les sables et les graviers, ou bien obtenus artificiellement par concassage de roches. Ils sont principalement destinés à la réalisation des ouvrages de génie civil, de travaux publics et de bâtiment. Les granulats représentent un élément important dans la composition du béton, lui octroyant consistance, volume et résistance. A titre d'exemple, les blocs en béton sont composés de 80 % de granulats. Il n'en demeure pas moins, qu'ils constituent la ressource naturelle la plus consommée dans le monde après l'eau. En effet, le marché mondial des granulats augmente en moyenne de 5,2 % par an depuis 2010. En 2013, la production mondiale des granulats est estimée à près de 28.7 milliard de tonnes et elle a atteint 48,3 milliards de tonnes en 2015. La technologie des bétons s'est développée de telle manière à obtenir des bétons de plus en plus performants avec un degré de technicité induisant des niveaux de performances et de sécurité requis pour la construction des ouvrages, ce qui a imposé une normalisation et une optimisation de la qualité des granulats. Il faut avoir, donc, une connaissance précise de ces matériaux très utilisés en génie civil, où ils doivent répondre à des critères de qualité et de régularité, définis par des normes.

Dans cette partie, on présente des généralités sur les granulats employés dans la formulation des mortiers et des bétons. D'abord, un rappel sur les différents types de granulats et un aperçu général sur leurs caractéristiques (intrinsèques, physiques et mécaniques). Ensuite, l'ensemble des propriétés physico-mécaniques et chimiques du béton. Enfin, l'effet des granulats sur les propriétés du béton et du mortier à l'état frais et durci.

1.2. Granulats

Les granulats sont des assemblages de particules solides, de dimension, de forme et de nature diverses qui sont destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des différentes couches constituant les chaussées, des assises et ballasts des voies ferrées et des remblais [6].

1.2.1 Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour composer un béton sont soit d'origine naturelle, artificielle ou alors recyclée comme c'est illustré sur la figure 1.1.

1.2.1.1. Granulats Naturels

Les granulats naturels d'origine minérale sont issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). Indépendamment de leur origine minéralogique, ils peuvent être classés en deux catégories:

- ✓ Ceux issus des carrières de roches massives : Dits concassé, obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. C'est ainsi que le sable concassé est fabriqué en gravière.
- ✓ Ceux issus des gisements alluvionnaires : Dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Se sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière ou en mer éventuellement [7].

Géologiquement parlant, les granulats naturels sont de nature :

- éruptives : granites, basaltes porphyres.
- sédimentaires : calcaires, grès, quartzites.
- métamorphiques : gneiss, amphibolites.

1.2.1.2. Granulats Artificiels

Les granulats artificiels sont soit des sous-produits de l'industrie sidérurgique, soit fabriqués en vue d'obtenir un produit particulier. Ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique des roches ou des minerais. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé, obtenu par refroidissement lent à l'air ; le laitier granulé de haut fourneau, obtenu par refroidissement rapide dans l'eau et les granulats allégés par expansion ou frittage (l'argile ou le schiste expansés). Les granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usage spécifique.

1.2.1.3. Granulats Recyclés

Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que ceux issus des ouvrages démolies

suite à des sinistres naturels comme les séismes et les crues, ou par vieillissement et dégradations. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.





Type de granulat	Gravier	Sable
Naturel		
Artificiel (Concassé)		
Recyclé (béton de démolition)		

Figure 1.1: Présentation des différents types de granulats

1.2.2. Caractéristiques des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de construction et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité (homogènes, durs, résistants à l'usure et au polissage) et possèdent, également, des qualités d'adhésion vis-à-vis au liant et ce pour chaque usage. Les granulats sont caractérisés par un certain nombre de propriétés liées à leur origine (Caractéristiques intrinsèques) et à leur mode de fabrication (caractéristiques de fabrication) [8].

1.2.2.1. Caractéristiques de fabrication

a) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique d'un matériau granulaire est régie par la norme EN 933-1 [9] et a pour objet de déterminer les proportions des différentes grosseurs des particules qui composent ce matériau au moyen de tamis. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe

granulométrique) [8]. Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable [10].

b) Classes granulaires

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d : le diamètre minimum représentatif des grains et D : le diamètre représentatif maximum). L'intervalle d/D est appelé classe granulaire. Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés (Norme NFP18-540) [11] :

- Les fines $0/D$ avec $D \leq 0,08$ mm
- Les sables $0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm

La figure 1.2 présente les différentes dimensions des granulats



Figure 1.2: Les différentes dimensions des granulats.

c) Module de finesse (des sables)

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur une série de tamis. Le tableau 1.1 présente la série des tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme française [11] et la norme européenne [12].

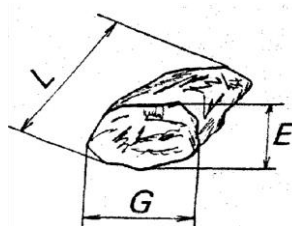
Tableau 1.1 : *Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.*

01	Tamis : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5mm	« NF P 18-540 » [11]
02	Tamis : 0.125 - 0.25- 0.5 – 1 - 2 et 4mm	« EN 12-620 » [12]

Un bon sable pour béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Au dessous de 2.2, le sable est riche en éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du besoin en eau. Au dessus de 2.8, le sable manque de fines particules et le béton y perd en ouvrabilité [10].

d) Forme

Lors de l'opération de concassage, on produit, suivant la nature de la roche et le type de l'appareil de concassage, des gravillons de mauvaise forme c'est-à-dire des aiguilles ou des plaquettes. La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois dimensions principales: épaisseur "E", grosseur "G" et longueur "L" comme c'est montré sur la figure 1.3.

**Figure 1.3:** *Forme du granulats.*

La proportion de matériau de mauvaise forme est évaluée par la détermination du coefficient d'aplatissement (A) selon la Norme NF EN 933-3 [13]. Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulats à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur G/E. Plus (A) est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats ou allongés. Une mauvaise forme a une incidence directe sur la maniabilité et favorise la ségrégation. Un gravillon de forme favorable (sphérique, cubique, nodulaire) présente un coefficient d'aplatissement généralement compris entre 5 et 20 %.

e) Angularité

On adopte la notion de rapport de concassage comme le rapport entre la dimension minimale du matériau d'origine et la dimension maximale (D) du granulats élaboré. Mais, elle peut être mesurée aussi par le temps d'écoulement d'un certain volume de granulats à travers un orifice donné caractérisant ainsi un coefficient d'écoulement des gravillons. Il en

va de même pour les sables, la méthodologie étant la même, seule différence, les dimensions de l'appareillage de mesure [8].

1.2.2.2. Caractéristiques physiques

a) Masse volumique apparente

La masse volumique apparente ρ_h est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulats, en tenant compte des vides qui peuvent exister entre les grains. Elle est déterminée selon la Norme NF EN 1097-6 [14].

b) Masse volumique absolue

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (hors pores). Elle est déterminée selon la norme NF EN 1097-7 [15]. La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue les granulats.

c) Porosité

C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis en eau et du volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon la norme EN 1097-3 [16]. La présence de pores internes dans les granulats est en relation directe avec la densité des granulats. Certaines pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface [17].

d) Propreté

On entend généralement par propreté l'absence dans un granulats des éléments fins indésirables hydrophiles ou non. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argile), soit des fines provenant du concassage ou du broyage des roches.

- Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau).
- Dans le cas des sables, la propreté est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau suivant la norme EN 933-8 [18].

e) Teneur en eau (W %)

La teneur en eau est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon.

f) Taux d'absorption d'eau

Le coefficient d'absorption en eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau à la masse de matériau

sec. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant. Il est déterminé selon la norme standard EN 1097-6 [14].

1.2.2.3. Caractéristiques mécaniques

Ils 'agit des caractéristiques régies par la qualité propre de la roche et sur lesquelles on n'a pas les possibilités d'action. Elles concernent sa dureté et sa résistance à l'usure par frottement. En général, les résistances des granulats dépendent de leurs compositions minéralogiques, de leurs textures et de leurs structures.

a) Résistance à l'attrition et à l'usure (Essai Micro Deval)

L'essai Micro-Deval (MDE), effectué selon la norme standard NF EN 1097-1 [19], permet de déterminer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. L'échantillon est soumis à un cycle d'usure, en présence d'eau, et en contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation. Le coefficient Micro-Deval obtenu est le pourcentage de la masse de l'échantillon passant au tamis de 1.6 mm après usure. Plus le pourcentage d'usure est bas, plus l'échantillon est résistant à l'usure.

b) Résistance à la fragmentation (Essai Los Angeles)

L'essai Los-Angeles, effectué selon la norme standard EN 1097-2 [20], estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements. L'essai consiste à mesurer la masse (m) d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètre compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 tours. A un coefficient Los-Angeles faible correspond un excellent matériau.

1.3. Béton

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans monde, plus de six milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans divers type de construction, à l'instar des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité, sa disponibilité, ses matières premières de faible coût et d'autres qualités. Les origines du béton de terre remontent à la plus haute antiquité, mais c'est au XXème siècle que l'utilisation du béton se généralise aux dépens de l'acier et de la maçonnerie. Dès lors, le béton doit répondre à un ensemble de spécifications très précises comme la rhéologie, la

résistance au jeune âge, les aspects de parement, la résistance à 28 jours, la durabilité etc. [21, 22, 23].

1.3.1. Compositions du béton

Le béton est un matériau composite aggloméré, composé essentiellement de granulats (gravier, sable et fillers). Le ciment sert de liant hydraulique, alors que l'eau de gâchage, et éventuellement d'adjuvants, ont pour objectif d'améliorer ou acquérir certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies. Ces différents constituants ont, bien entendu, des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques diverses [24].

- Ciment: c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau pour devenir résistant, et lier, ainsi, tous les ingrédients.
- L'eau: c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- Les granulats: ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- Le sable: il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.
- Les superplastifiants: ils augmentent l'ouvrabilité du béton (qualité essentielle pour le béton).

1.3.2. Propriétés des bétons

1.3.2.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton (frais) et sa bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée principalement par la granulométrie et la forme des granulats, la nature et le dosage de ciment, le dosage en eau et par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams et l'essai d'étalement à la table à secousses.

1.3.2.2. Rhéologie

La rhéologie est définie comme étant l'étude de l'écoulement et de la déformation de la matière sous l'action d'une contrainte [25, 26]. Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventée par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par Eugene Cook Bingham [25]. Entre le solide parfait et le liquide

parfait newtonien, il est devenu nécessaire d'élaborer une discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [27] avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe telles que: pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, l'étude se base sur l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable. Pour étudier les paramètres de l'écoulement du béton, certaines notions doivent être décrites.

a) Contrainte de cisaillement

Considérons deux couches au contact l'une de l'autre, elles se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement τ [Pa], qui s'exercent tangentielllement à la surface de la couche [28], ce sont les forces de cisaillement (figure 1.4).

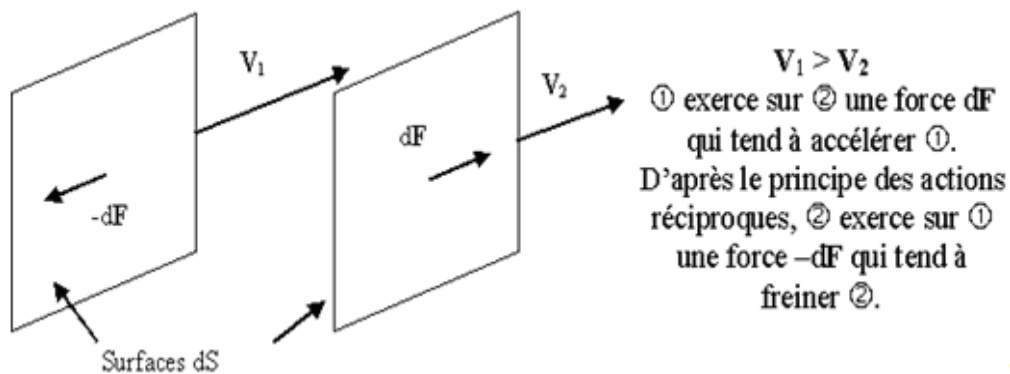


Figure 1.4: Schéma de la contrainte de cisaillement.

Ces forces dépendent de la surface considérée d'où la contrainte de cisaillement est

définie par :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1.1)$$

Où:

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. Elle varie en général d'une couche à l'autre mais elle demeure constante en tout point de la même couche.

b) Vitesse de cisaillement

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre deux plans parallèles de surface S séparées d'une distance dz . Un des plans est fixe, et le second se déplace d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 (figure 1.5).

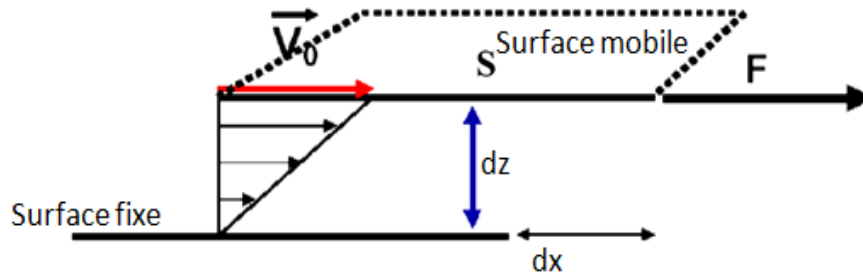


Figure 1.5: Schéma de vitesse de cisaillement.

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbolisée γ , suivant la relation ci-après:

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad (1.2)$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement. Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [27].

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad (1.3)$$

c) Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al. [29] ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains

composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (figure 1.6).

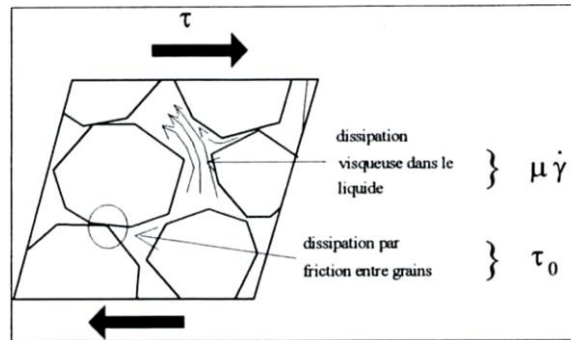


Figure 1.6: Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [29].

d) Viscosité

La viscosité plastique est le résultat macroscopique de dissipations visqueuses engendrées par le mouvement de l'eau dans la porosité du système granulaire. D'après Couarraze et Grossiord [27], la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise leur comportement rhéologique. En Principe, on considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumises à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (figure 1.7), en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé viscosité μ [Pa. s]. Le coefficient de viscosité dynamique peut être défini mathématiquement par la formule suivante:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{1.4}$$

Où:

τ : indique la force par unité de surface $\frac{dF}{dS}$, Son unité de mesure est le Pa.

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement appelé gradient de vitesse $\frac{\partial v}{\partial y}$, Son unité de mesure est la s^{-1} .

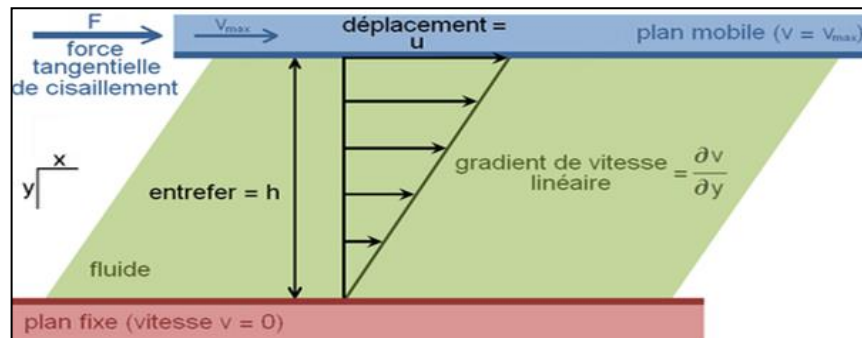


Figure 1.7: Schéma de glissement des couches.

e) Appareils de mesures la rhéologie

L'étude de la rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. À ce jour, plusieurs études en laboratoire ont été réalisées. Plusieurs rhéomètres à béton sont maintenant disponibles sur le marché permettant de mesurer les paramètres rhéologiques du béton. Dans cette perspective, on présente quelques rhéomètres qui sont approuvés et utilisés pour estimer les paramètres rhéologiques dans certains travaux de recherche.

- Rhéomètres agitateurs-malaxeurs (Two-point-test, IBB)

Le premier des appareils rhéomètres de type malaxeur est créé en 1987 par Tattersall et al [30] appelé MK1, il s'agit du Two-point-test. Cet appareil est, en fait, un malaxeur instrumenté qui permet de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. Le principe de l'appareil a été modifié en changeant la géométrie de l'agitateur pour donner les deux versions MK2 et MK3.

Le MK2 est conçu pour les bétons de grande maniabilité (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams). L'agitateur de forme cylindrique est garni de pales de forme hélicoïdale ininterrompue. Il s'agit d'un des appareils les plus utilisés en laboratoire.

Le MK3 est utilisé pour les bétons de faible maniabilité (affaissements inférieurs à 50 mm). L'agitateur en forme de H effectue lors des essais un mouvement planétaire (figure 1.8). Ce mouvement permet de conserver l'échantillon homogène lors des essais.



Figure 1.8: *Rhéomètre Two-point-test* [30].

Le rhéomètre IBB est développé en 1994 par Beaupré et al. [26]. Cet appareil est complètement automatisé (figure 1.9). Les vitesses et les couples sont mesurés et enregistrés automatiquement, sur l'ordinateur à l'aide d'un capteur de vitesse et d'une cellule de charge placée sur l'arbre principal. Il peut mesurer les paramètres rhéologiques de divers bétons jusqu'à des affaissements de 25 mm.



Figure 1.9: *Rhéomètre à béton IBB* [26].

- Rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML, Cemagref)

Le rhéomètre BML (building material learning) est un rhéomètre à cylindre coaxial avec une rotation de cylindre extérieur tandis que le cylindre intérieur est fixe (figure 1.10). Ils ont été développés par Wallevik et Gjorv [31]. Les cylindres sont munis de redans parallèles à leur axe. Ces géométries permettent de limiter le glissement à la surface des cylindres. La consommation du béton est importante au cours de cet essai (17 litres). Il est à signaler que cet appareil est entièrement piloté par ordinateur.



Figure 1.10: *Rhéomètre BML*

D'après Coussot et al [32], Le Rhéomètre du Cemagref est un rhéomètre à cylindres coaxiaux avec une rotation du cylindre interne contrairement au BML. Il a été utilisé dans le domaine de la géotechnique, plus précisément dans la mesure rhéologique des boues et des laves torrentielles. Il nécessite une quantité importante du béton (500 litres) pour effectuer un essai (figure1.11).



Figure 1.11: *Rhéomètre à béton du Cemagref.*

- *Rhéomètre plan-plan(BT Rhéom)*

Le BT Rhéom est un rhéomètre composé de deux plans un en rotation et l'autre fixe (figure 1.12). Ce rhéomètre est développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Paris par une équipe dirigée par De Larrard au début des années 1990 [33]. Il peut inclure 7 litres de béton. L'avantage de ce rhéomètre est que les paramètres rhéologiques sont calculés et obtenus directement en unité fondamentale et il peut être utilisé sur chantier comme en laboratoire.



Figure 1.12: Rhéomètre à béton BT Rhéom.

1.3.2.3. Retrait

Le retrait est la diminution dimensionnelle de longueur d'un élément de béton dû essentiellement au mouvement d'eau dans la matrice cimentaire et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment, selon les circonstances. Au cours de l'évolution de la pâte de ciment, on peut distinguer cinq types de retrait :

- Retrait plastique dû à la dessiccation de la pâte de ciment en début de prise.
- Retrait par auto-dessiccation (endogène) au cours de l'hydratation.
- Retrait thermique causé par les différences de température au cours de l'hydratation.
- Retrait à long terme causé (séchage) par l'évaporation de l'eau contenue dans le béton.
- Retrait de carbonatation résultant de la réaction chimique qui se produit entre la chaux libérée par l'hydratation et le gaz carbonique de l'atmosphère, cette réaction libère l'eau pour former un carbonate de Calcium.

1.3.2.4. Compacité et porosité

La compacité est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre. Mais, la porosité c'est le pourcentage de vides rapporté au volume total du béton frais. Donc, la compacité et la porosité sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, assurant certaines propriétés de ce dernier telles que, ses résistances mécaniques, sa perméabilité, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. Le sable provoque un effet essentiel sur la compacité et la porosité parce qu'il permet de remplir les pores contenus

dans les granulats. Le sable avec des particules ultrafines réduit la porosité du béton, c'est-à-dire le pourcentage de vides.

1.3.2.5. Perméabilité

La perméabilité est la mesure de la migration d'eau à travers le béton. Un béton perméable ouvre la porte aux différents agents agressifs extérieurs (eau, air, ou un autre gaz) qui sont la principale cause de la corrosion des armatures et de la dégradation du béton. À l'inverse, un béton étanche ou très peu perméable est un béton durable. La perméabilité est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.) qui varie avec la progression d'hydratation.

1.3.2.6. Résistance mécanique

La résistance mécanique est une caractéristique essentielle du béton durci. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique dépend d'un certain nombre de paramètres à savoir :

- La nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant).
- Les conditions de mise en œuvre de ces constituants.
- Les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

a) Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Une bonne résistance à la compression est la qualité la plus recherchée pour le béton durci. Cette résistance est caractérisée par la valeur mesurée des éprouvettes écrasées à vingt-huit jours (R_{c28}) selon la norme NF EN 12390-3 [34].

b) Résistance à la traction

La résistance à la traction est moins étudiée que celle à la compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points. Cette résistance est caractérisée par la valeur mesurée des éprouvettes écrasées à vingt-huit jours (F_{t28}) selon la norme NF EN 12390-5 [35].

1.3.2.7. Durabilité

Un ouvrage en béton doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service. La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Les facteurs influençant la durabilité du béton peuvent être internes ou externes au béton.

- Internes : comme la fissuration, perméabilité et diffusivité, porosité, perméabilité aux ions chlore (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réactions alcalis granulats et les ions sulfates
- Externes : comme l'instar des ambiances hivernales (la répétition des cycles de gel dégel, l'action des sels de déverglace et formation de sels gonflants), et des ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux de pluies de neiges, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides, les bases ainsi que toutes les solutions résultant de la dissolution de sel ou de gaz [36].

1.4. Influence des granulats sur les propriétés des bétons

Les caractéristiques des granulats ont une forte influence sur la performance du béton, y compris son ouvrabilité, son module d'élasticité, sa résistance mécanique, etc. Les divers types des bétons actuels, aux propriétés variables, doivent présenter une bonne stabilité (résistance à la ségrégation), une bonne rhéologie et des résistances mécaniques souhaitées. Le choix des granulats joue un rôle majeur pour l'obtention de ces différentes propriétés. Les granulats occupent un volume important dans le mélange du béton d'environ de 70 à 80%, ce qui rend leurs caractéristiques fondamentales pour réaliser un béton de qualité.

1.4.1. Propriétés à l'état frais

1.4.1.1. Influence des granulats sur l'ouvrabilité

Pour un béton ou un mortier, l'ouvrabilité est généralement difficile à mesurer à cause de la combinaison des plusieurs paramètres essentiels dans la composition d'un béton (le dosage en eau, le dosage et la nature du liant, la forme et la texture des granulats) [37, 38]. D'autres paramètres, peuvent affecter d'avantage l'ouvrabilité du béton tels que : le malaxage, le transport du béton, la température, l'hygrométrie, les fines des sables et l'influence des adjuvants.

D'après Jamkar et al. [39], la quantité d'eau, nécessaire pour une ouvrabilité donnée, augmente avec l'augmentation de l'indice de la forme et la texture des gros granulats. Les granulats anguleux avec une texture de surface rugueuse comme les granulats concassés et recyclés nécessitent plus d'eau pour une ouvrabilité donnée que les granulats arrondis à texture lisse [10, 38]. De même, les granulats fins angulaires produisent un mortier de maniabilité inférieure que le sable de forme sphérique pour la même quantité d'eau [40,41]. Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable [10]. D'après l'étude menée par Gordana et al. [42], lorsque le rapport E/C augmente, l'ouvrabilité augmente pour les différents mélanges de bétons. Les mélanges de béton avec des agrégats de rivière(R) présentent les valeurs d'affaissement les plus élevées. Par contre, les valeurs d'affaissement sont presque identiques pour les mélanges de béton avec du calcaire (K) et d'andésite(A). Les mélanges du béton à base de basalte(B) donnent les valeurs les plus faibles, ces résultats sont indiqués sur la figure 1.13.

Abdullahi [43], a étudié l'effet de trois différents types du granulat (gravier de rivière, Quartzite et granit) sur l'ouvrabilité du béton. Il a observé que les valeurs d'affaissement des différents mélanges du béton varient de 35 à 70 mm, la valeur la plus élevée à été obtenue avec le béton à base de gravier de rivière ayant une surface relativement lisse et une forme ronde, qui à l'action de l'eau courante améliore l'ouvrabilité du béton frais. Par contre, le béton contenant du quartzite concassé et du granit présente une ouvrabilité plus faible par rapport au béton fait avec du gravier de rivière, cela est dû à la surface rugueuse et à la forme angulaire des particules du granulat

quartzite et granite qui exigent plus de quantité d'eau pour fournir un revêtement pour la lubrification des granulats.

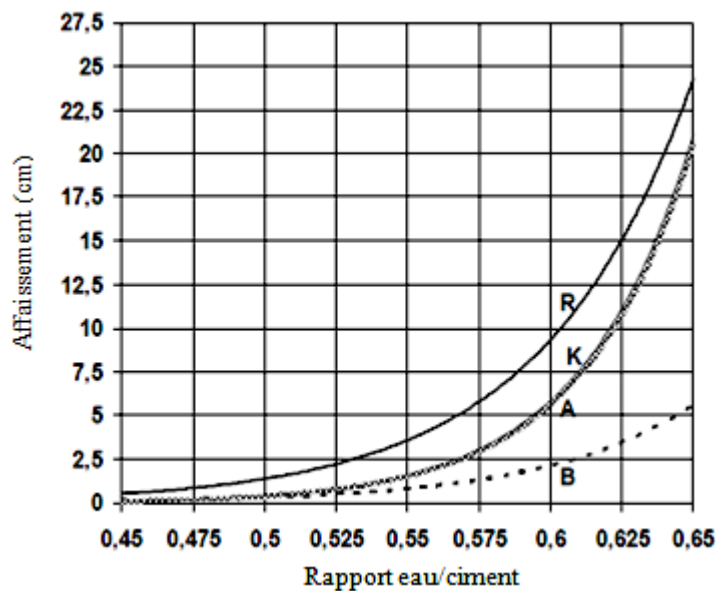


Figure 1.13: Influences de rapport E/C sur l'affaissement du béton pour différent type des granulats [42].

1.4.1.2. Influence des granulats sur les paramètres rhéologiques

Selon l'étude menée par Westerholm et al. [44], le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du mortier pour différents granulats fins augmentent respectivement de 96 Pa à 550 Pa et de 1.3 Pa.s à 8.8 Pa.s (figure 1.14). Ils ont conclu que le mortier avec des granulats fins provenant des roches concassées (C1-C12) affichent généralement un seuil de cisaillement et une viscosité plastique plus élevée que le mortier de référence avec des granulats fins naturels (N1). Ceci est dû à la forme irrégulière des particules du granulat fin concassé qui demande plus d'eau. En outre, l'augmentation de la finesse du granulat fin (sable) augmente principalement le seuil de cisaillement, tandis que l'augmentation du contenant des fins donne un seuil de cisaillement et une viscosité plastique plus élevés dans le mélange du mortier [45]. Cependant, pour un coefficient d'équivalent de sable inférieure à 75%, on a enregistré une augmentation du seuil de cisaillement, et par conséquent une augmentation de la demande en eau. En Arabie Saoudite, la valeur du coefficient d'équivalent de sable doit être 75% afin de satisfaire les règlements régissant les granulats fins utilisés dans le béton destinés à la construction des ponts et des routes [46].

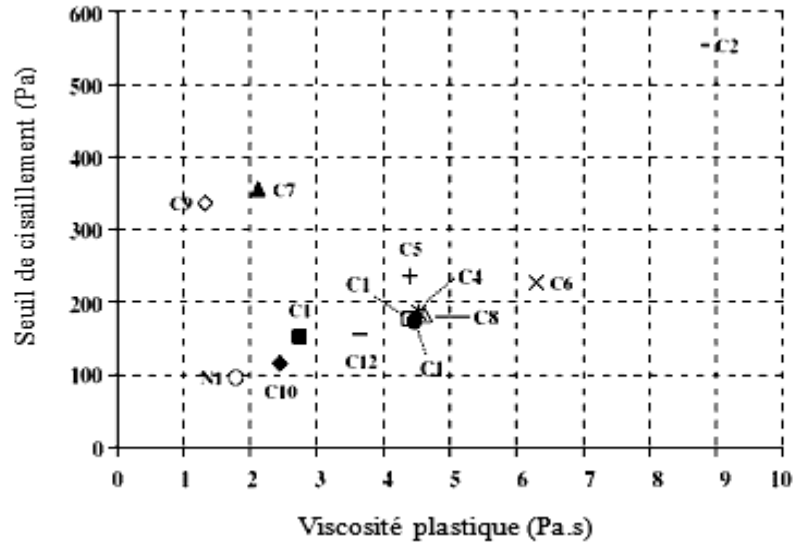


Figure 1.14: Variation de seuil de cisaillement et de la viscosité plastique pour différent granulats fins [44].

1.4.2. Propriétés à l'état durcis

1.4.2.1. Influence des granulats sur la résistance mécanique

D'après Neville [38], la résistance à la compression du béton est plus faible (est 10 % inférieure) lorsque les granulats présentent une surface lisse contrairement à ce que l'on obtient avec des granulats concassés de forme angulaire et de surface rugueuse. Par conséquent, la texture des granulats concassés, entraîne une meilleure adhésion entre les granulats et la matrice de ciment (figure 1.15).

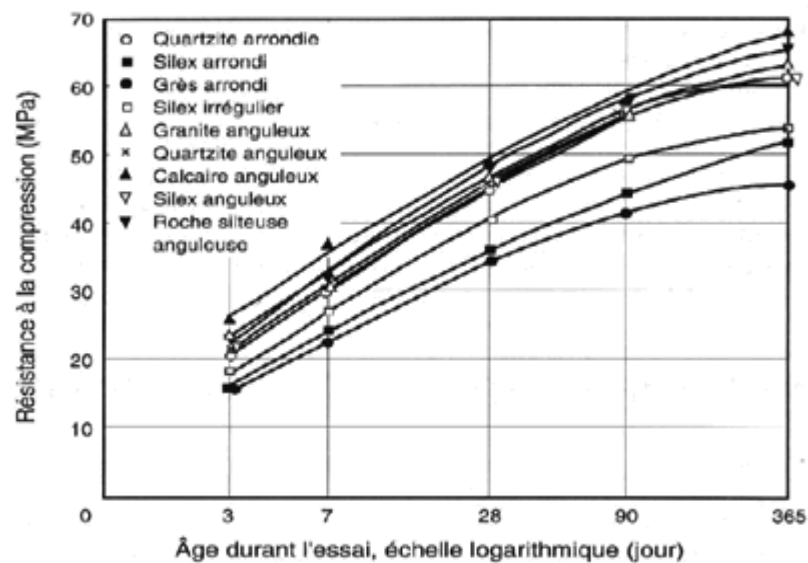


Figure 1.15: Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons confectionnés avec différents granulats ($E/C=0,50$) [38].

Nenoet al.[47] ont obtenu des résistances à la compression et à la flexion élevées pour des mortiers à base de 20%, 40% et 100% des granulats fins recyclés, par rapport au mortier de référence. Ils ont expliqué ces résultats par la surface spécifique qui est plus élevée pour les granulats fins du béton recyclés, la quantité de ciment non hydraté qui complète sa réaction hydraulique en contact avec de l'eau, la plus grande cohésion entre les particules et la rétention d'eau qui reste plus élevée dans un mortier contenant des granulats fins recyclés. Les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons recyclés est généralement moindre. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulat naturel, affecte davantage cette dureté donc sa qualification [48].

La texture de surface du granulat affecte la liaison entre la pâte de ciment et le granulat et ainsi la résistance du béton (notamment celle de la traction). Une meilleure adhésion entre les granulats et la pâte de ciment a été trouvée avec des granulats concassés de texture plus rugueuse, qu'avec des granulats roulés [38, 49 et 50]. Par contre, les granulats plats et allongés sont généralement friables, donc ils sont à proscrire. En plus, il est connu que les bétons conçus avec des granulats concassés génèrent une surface spécifique plus développée et demandent plus d'eau que les granulats roulés ce qui affecte la résistance. D'après des résultats obtenus par Neville [38], les résistances à la compression du béton peuvent être majorées d'environ 38% lorsque des graviers concassés ont été employés à la place de graviers roulés.

La résistance à la compression des bétons est influencée directement par la résistance des granulats utilisés. Celle-ci dépend, à son tour, de la densité brute des granulats. Suivant les travaux de Kilic et al. [51], les valeurs de la résistance à la compression des bétons avec des différentes roches des granulats, à savoir : les grès, le calcaire, le quartzite, le basalte et le gabbro atteignent respectivement de 53, 108, 103, 132 et 136 MPa, tandis que la résistance à la compression de ces granulats était de 52, 110, 160, 132 et 247 MPa. Cependant, les résultats trouvés ont été présentés dans la figure 1.16 qui montre une relation linéaire entre la résistance à la compression du granulat et la résistance à la compression du béton avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0.8 [51].

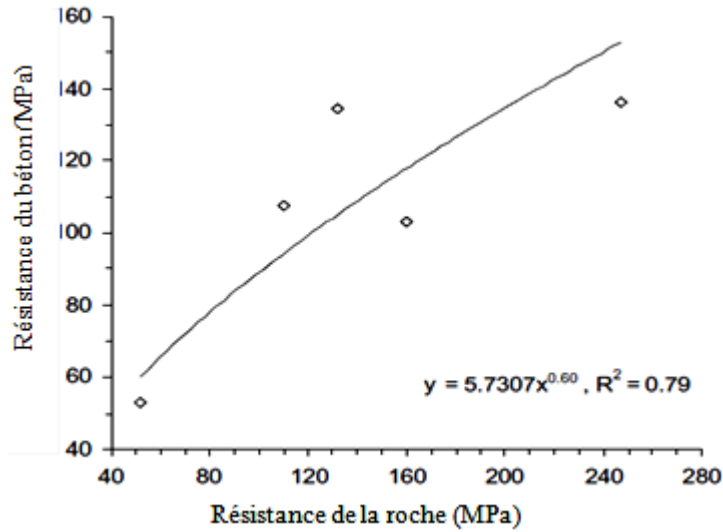


Figure 1.16: Relation entre la résistance à la compression du béton et la résistance à la compression du granulat [51].

Le rapport G/C est un facteur de moindre importance sur l'évolution de la résistance à la compression. Avec un rapport E/C constant, il a été démontré qu'un béton faiblement dosé en ciment demeurerait plus résistant selon les résultats de la figure 1.17 [38, 52]. L'explication la plus probable est le faible pourcentage des vides par rapport au volume total de béton.

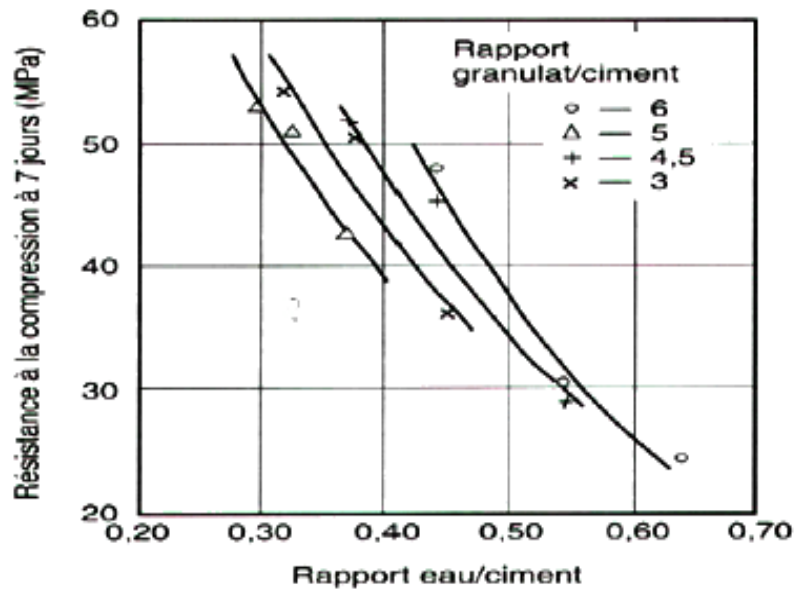


Figure 1.17: Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [38].

Les études faites sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons indiquent que lorsque le pourcentage du volume des granulats augmente de 0 à 20 % par rapport au volume total, on enregistre une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, c'est une augmentation qui est enregistrée [38].

Pour obtenir une résistance à la compression maximale, le mélange granulaire doit être optimisé pour laisser le moins de vides possible et la pâte de ciment doit combler les vides, mais sans excès de pâte. Le rapport G/S influe sur la résistance du béton, mais la tendance et l'amplitude de cette variation dépend du type de sable, du type de graviers et du dosage en ciment. Quand le rapport G/S est faible, l'espace inter-granulaire diminue mais la surface spécifique des granulats est élevée. Ainsi, on a besoin de plus de pâte de ciment pour couvrir la surface des granulats. Par contre, l'augmentation du rapport G/S diminue les surfaces spécifiques des granulas (moins de fines).

Selon Neville [38], les bétons sans fines sont des bétons constitués uniquement de graviers, d'eau et de ciment, conçus surtout avec une consistance ferme et avec peu de ciment pour avoir des résistances de l'ordre de 10 MPa. Pour remplir les grands espaces inter-granulaires on a besoin de plus de pâte de ciment ce qui rend le béton plus faible vis à vis des variations de la température et de toutes sortes d'agression chimique, en d'autres termes on obtient un matériau très réactif à l'environnement et en conséquence moins performant en matière de durabilité. Donc, il faut trouver un rapport G/S idéal pour atteindre l'affaissement et la résistance désirée selon la qualité des granulats.

1.4.2.2. Influence des granulats sur le module d'élasticité

Selon Neville [53], le module d'élasticité dépend du module d'élasticité de granulats et de la fraction volumique qu'ils occupent dans la matrice cimentaire. Le module d'élasticité croît avec la rigidité et la fraction volumique des gravillons. [53, 54]. On outre, une mauvaise qualité d'interface entre le granulat et la matrice cimentaire conduit à une diminution du module d'élasticité du béton [55].

Makani [56] à étudié l'influence de la nature minéralogique du granulat sur le comportement mécanique des bétons, ils ont constaté que le module d'élasticité la plus forte obtenue pour le béton BHP du granulat calcaire concassé (49,4 GPa). De plus, le BHP avec granulats de Grès quartiztique concassé se caractérise par la résistance en compression la plus faible (66,7 MPa) et par un module d'élasticité (42,9 GPa) proche de la moyenne (42,1 GPa) des valeurs obtenues pour l'ensemble des mélanges réalisés. Ainsi, le module d'élasticité minimal est effectivement mesuré pour le BHP avec granulat de diabase quartizite concassé et granulats siliceux roule. En revanche, le classement des deux valeurs de modules des granulats, 97 GPa pour le grès et 80 GPa pour le calcaire ne coïncident pas

avec ceux des bétons associés, à savoir 49,4 GPa pour le calcaire et 42,9 GPa pour le grés. Néanmoins, la quantité supérieure de granulats calcaire (G/S égale à 1,5 contre 1 pour le grés) pourrait expliquer cette inversion des ordres. Les calcaires sont considérés comme étant de bons granulats s'ils sont durs et peu poreux [57].

1.4.2.3. Influence de granulats sur le retrait

Le retrait est plus important dans le cas d'utilisation des granulats légers qui possèdent un module élastique plus faible et qu'ils offrent donc moins d'opposition au retrait potentiel de la pâte de ciment [58]. Le retrait de la pâte de ciment est d'autant plus grand que le rapport E/C est plus élevé. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favorisée par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés [10]. D'après Neville [38], les granulats naturels ne sont pas sujets au retrait, mais il existe des roches dont le retrait voisine celui d'un béton à granulats sans retrait, le calcaire est classé comme granulats sans retrait, en revanche, sa dilatation très faible diminue les propriétés thermiques du béton car les granulats calcaires peuvent présenter des différences significatives au niveau du coefficient de dilatation avec la pâte de ciment, qui peut rompre la liaison pâte granulats [38].

1.4.2.4. Influence sur la perméabilité des bétons

La perméabilité du béton se singularise par la perméabilité de la pâte de ciment et la perméabilité des granulats. Si la perméabilité de la pâte de ciment hydratée est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats, celle des granulats naturels se distingue par la nature des pores qui sont habituellement non interconnectés. En plus, lorsque les granulats sont enrobés par la pâte de ciment, ceux-ci ne participent presque pas à la perméabilité du béton [38]. En revanche, l'utilisation des granulats de grand diamètre et avec une grande proportion augmente la perméabilité [59], ce qui a été remarquée, surtout, dans l'interface pâte granulats. Il est à noter que la perméabilité du béton diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C.

1.4.2.5. Influence sur l'absorption d'eau des bétons

Le volume des pores d'un béton se mesure par l'absorption d'eau. Celle-ci est un phénomène physique du comportement hydrique du béton durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Le processus d'absorption d'eau peut être qualifié par deux

paramètres ; l'absorption initiale, représentative de la dimension des gros capillaires, et l'absorptivité, représentative du volume des capillaires fins [60]. L'absorption d'eau est un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des bétons, car un grand nombre d'agressions telles que l'attaque par les sulfates, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du béton est faible. L'emploi du béton mixte à base de sable naturel et du gravier recyclé est fortement recommandé pour des conditions d'agressivité moyenne [60].

L'absorption d'eau d'un béton recyclé est plus élevée que celle du béton naturel (presque 3 fois). Olorunsogo et al. [61] ont constaté que l'eau absorbée par un béton à 100% de granulats recyclés était d'environ 39% plus élevée que celle du béton à base de granulats naturels après 28 jours de séchage. Ledesma et al. [62] ont trouvé que le mortier avec un taux de remplacement du sable naturel par des granulats fins recyclés du béton de 5 et 10% présente une faible absorption d'eau que le mortier témoin.

1.5. Conclusion

D'après ce qui a été présenté dans cette partie bibliographique, on peut conclure que :

- Un bon béton n'est acquis, que lorsque trois objectifs essentiels sont accédés : obtenir une résistance mécanique, obtenir une rhéologie qui permet une mise en œuvre facile et un squelette granulaire donnant une compacité maximale.
- Comme il n'existe pas une grande variété de granulats disponibles en un lieu donné, la formulation d'un béton devra tenir compte des ressources locales et des coûts. C'est pourquoi les propriétés intrinsèques des granulats ne sont pas toujours valorisées dans les bétons.
- Une bonne compréhension de l'influence des caractéristiques physiques des granulats sur la performance des bétons est nécessaire pour leur optimisation afin d'obtenir un bon rapport performance-coût.
- Les granulats concassés et recyclés améliorent les caractéristiques mécaniques du béton et du mortier.
- La texture des granulats concassés, entraîne une meilleure adhésion entre les granulats et la matrice de ciment, à condition que ceux-ci ne contiennent pas des matières nuisibles à l'adhérence.

- La forme et la texture de particules de sable concassé de forme angulaire et de surface rugueuse pourraient améliorer la résistance du béton grâce à une meilleure cohésion entre les particules.
- Les granulats roulés confèrent une meilleure ouvrabilité aux bétons, cependant ces bétons, sont moins stables que ceux produits avec des granulats concassés.
- La résistance du béton n'est pas seulement l'effet de la résistance mécanique des granulats, mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison.

Chapitre 02

Utilisation des sables de concassage dans le béton et mortier

2.1. Introduction

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Le sable naturel qui est le plus couramment employé comme granulat fin au béton ou au mortier, pour les besoins de la construction et des travaux publics, est coûteux en raison du coût excessif de transport à partir de ses sources naturelles. Aussi l'épuisement des ressources de sable naturel à grande échelle crée des problèmes environnementaux tels que, la perte de l'eau conservée dans les couches du sable, l'approfondissement des cours d'eau et la perte de la végétation sur la rive des rivières. Ceci expose le puits d'admission des systèmes d'approvisionnement en eau à des perturbations, accélère l'érosion des berges des oueds, entraîne l'avancée des mers, perturbe la vie aquatique ainsi que l'agriculture en raison de l'abaissement de la nappe d'eau souterraine. En conséquence, la recherche des solutions alternatives est beaucoup encouragée. Les sables de concassage issus des carrières calcaires sont plus adaptés pour remplacer positivement le sable naturel. De nombreuses études ont déjà été réalisées ou sont en cours sur cette problématique.

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu, l'effet des fillers calcaires présents dans le sable de concassage sur les propriétés du béton ou du mortier à l'état frais et durci. Ensuite, on expose les différents travaux concernant l'effet de l'utilisation du sable de concassage sur les propriétés du béton et dans le mortier, notamment la substitution totale et partielle du sable naturel par le sable de concassage.

2.2. Production du sable de concassage en Algérie

Le sable de concassage, connu aussi sous l'appellation du sable de carrière, est obtenu à partir du concassage des roches calcaires, andésite, granite, dolomie et basalte. Ses dimensions se situent entre 0 et 6 mm. En raison du processus de broyage, le sable de concassage diffère des sables naturels par la granulométrie, la forme et la texture des particules, de même il contient généralement entre 10 % et 20 % de fines (les particules passant au tamis de 80 μm). Les fines sont généralement très probablement les plus petites fractions granulométriques de granulat concassé dans le sable de concassage, alors que dans les sables naturels, les fines peuvent être des argiles ou autres particules nocives. L'emploi des sables est déterminé par la dimension des grains et les caractéristiques

intrinsèques (mécaniques et chimiques) de la roche dont ils proviennent. En règle générale, ils s'utilisent pour des sous-fondations et fondations, dans des applications liées au ciment, le béton à titre d'exemple et pour la production des mélanges bitumineux.

L'Algérie a élaboré en 2005 [Loi n° 05-12, 2005] une instruction ministérielle organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le domaine du bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux. Une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable.

La politique d'encouragement de la production et de la consommation du sable de concassage en appoint au sable naturel de construction, afin de préserver les sables des plages et des oueds, commence à porter ses fruits. C'est ainsi et depuis l'année 2005, la production de sable concassé est en croissance continue, permettant ainsi de répondre à la demande croissante du marché du bâtiment et des travaux publics. De 2.72 Millions de m³ de sable concassé produit en 2005, la production a presque quintuplé, en passant à 13.36 Millions de m³ en 2009, soit une hausse de +391.2%. Selon des chiffres avancés par l'ANPM (Agence Nationale du Patrimoine Minier), la production nationale du sable concassé est de 14 millions de tonnes en 2013, alors que les besoins en matière du sable de construction sont estimés à près de 30 millions de tonnes par an.

Au cours de l'année 2008, 637 exploitations minières de production de sable concassé étaient en activité dans 41 wilayas, parmi lesquelles 603 unités de production des agrégats et de sable concassé simultanément et 34 exploitations minières ayant produit uniquement du sable concassé, et ce dans 4 wilayas. En ce qui concerne la production du sable concassé, la figure 2.1 représenté les 10 wilayas les plus productrices du sable de concassage en Algérie. Les 10 wilayas sont Bordj Bou Arreridj avec 12,4% de production, Constantine 11,5%, Sétif 7,2%, Oum El Bouaghi 6,8%, Bouira 6,7%, Mila 6,3%, Ain Defla 6%, Batna 5,5%, Boumerdes 5,4% et Sidi Bel Abbes 3,9%. Pour ce qui est des autres wilayas, ces dernières sont arrivées à produire un total de 28,3% du sable concassé durant l'année 2009.

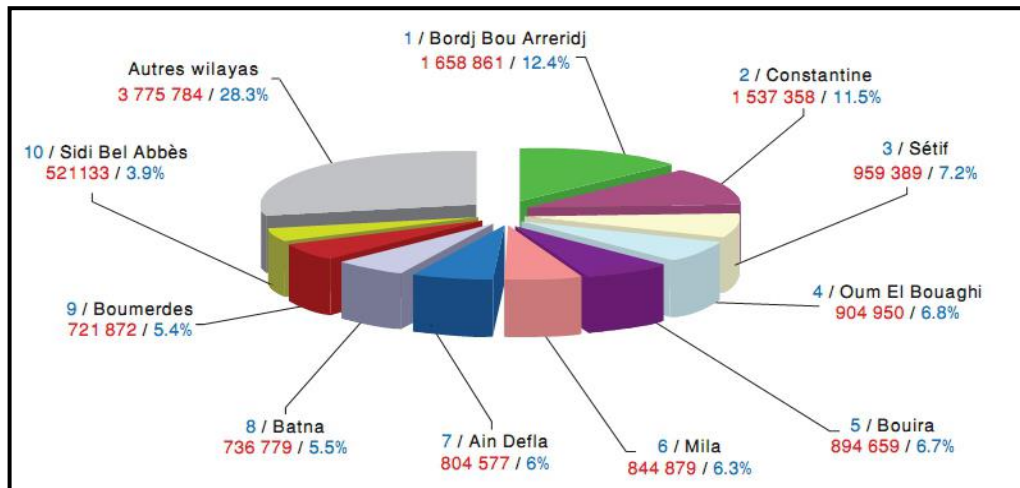


Figure 2.1: Production du sable concassé (m3) année 2009 (10 wilayas les plus productrices). [63]

2.3. Effet des fines calcaires du sable de concassage

Dans ce paragraphe on présente quelques travaux de recherches concernant l'effet des fines calcaires issues du sable de concassage sur les propriétés du béton et du mortier à l'état frais et durci. Avant de mettre en exergue cet effet, on propose une définition des fillers calcaires, leur provenance, les exigences auxquelles ils doivent répondre et leurs rôles.

Par définition les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage et/ou sélection, provenant des gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. Les fillers se différencient les uns des autres par:

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface, leur dureté et leur porosité.

Le calcaire doit respecter les exigences suivantes [64]

- La teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) doit être supérieure ou égale à 75% en masse.
- La teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène ne doit pas être supérieure à 1,20g/100g.
- La teneur totale en carbone organique doit être inférieure à 0,50 % en masse.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un ciment CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle. Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolaniques [65, 66].
- Un rôle chimique, en conduisant à l'accélération de l'hydratation du ciment Portland de la phase aluminat du ciment C_3A , surtout celle de C_3S au jeune âge et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates [67, 68].
- Un rôle physique, en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

2.3.1. Ouvrabilité

L'augmentation de la demande en eau des mélanges des bétons et des mortiers à base de sable de concassage est l'un des problèmes qui se posent pour l'obtention d'une ouvrabilité adéquate. Cet effet nocif est dû principalement à la présence d'un pourcentage élevé de fines, à la forme et à la texture du sable de concassage. Cette augmentation de la demande en eau peut être réduite par l'utilisation des superplastifiants [69, 70]. Bonavetti et al. [71] ont étudié l'influence du pourcentage de fines calcaires, dans le sable, sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. Trois types de fines ont été utilisés lors de cette étude de nature quartz, granite et calcaire. Ils ont trouvé que la demande en eau augmente avec l'augmentation du taux de fines dans les mortiers notamment les fines de calcaires et de granites. Cette augmentation est beaucoup plus remarquable lorsque le pourcentage de fines dépasse 10%. Cet effet semble dû à la grande surface spécifique des fines.

Benabed et al. [72] ont trouvé que l'incorporation de 10% à 15% de fines calcaires, au mélange du mortier, améliore l'aptitude d'ouvrabilité. Cependant, quand le taux dépasse 15% une diminution considérable de la valeur d'étalement du mortier et une augmentation de temps d'écoulement ont été enregistrées comme c'est montré sur la figure 2.2. Ils ont attribué cet effet à la finesse et à la surface spécifique de particules fines qui nécessite plus d'eau pour se mouiller. Cependant, de nombreux auteurs [70, 25, 73 et 74] ont montré que l'incorporation de 5% à 10% de fines calcaires améliore l'ouvrabilité.

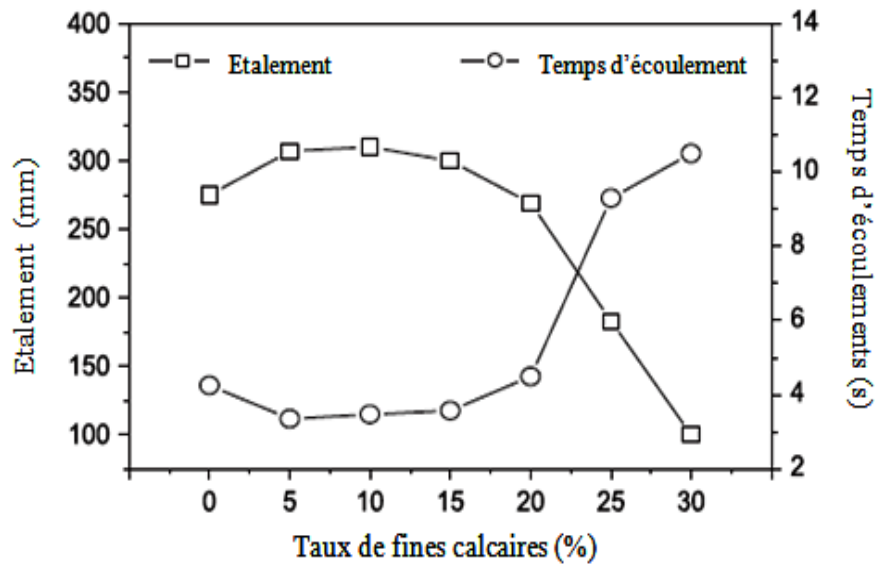


Figure 2.2: Etalement et le temps d'écoulements du mortier en fonction de taux des fines calcaires [72].

D'après une étude de l'effet de fines calcaires dans le sable concassé réalisée par Kenai et al. [70], l'augmentation du pourcentage de fines calcaires augmente la demande en eau de gâchage. Le rapport E/C augmente d'environ de 0.61, 0.62, 0.64 et 0.66 respectivement pour des taux de fines de 0%, 10%, 15% et 20% (figure 2.3). Ils ont attribué cet effet à la grande surface spécifique, à la forme et à la texture des fines calcaires. De plus, différents auteurs ont établi que les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais [76; 77; 78].

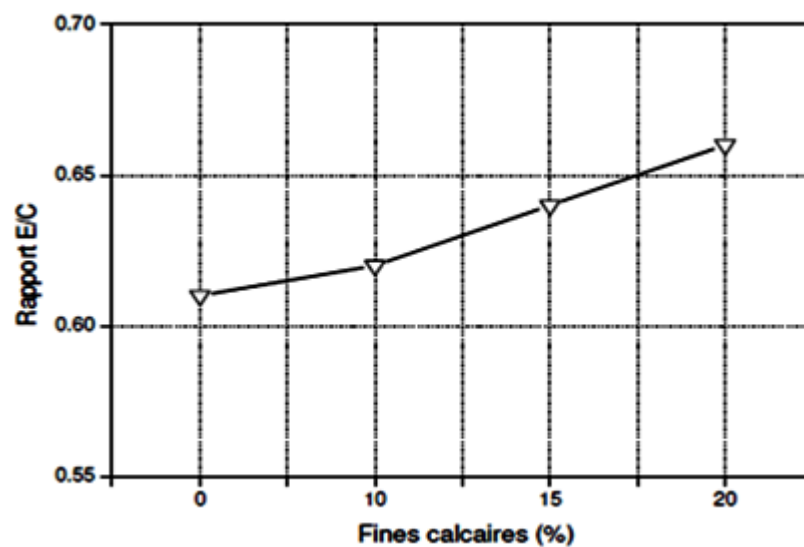


Figure 2.3: Variation du rapport E/C avec le pourcentage de fines calcaires [70].

2.3.2. Paramètres rhéologiques

Neto et Campitelli [79] utilisent le « tow-points » test pour évaluer la rhéologie de la pâte de ciment contenant du filler calcaire. Ils ont observé que les valeurs du seuil de cisaillement diminuent avec l'augmentation de la teneur en fillers calcaires, par contre la viscosité plastique augmente avec l'augmentation du taux des fillers calcaires. En plus, cette substance influence la demande en eau et peut mener à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire [80, 81]. Ceci peut justifier l'utilisation des fillers calcaires à des dosages élevés comme ajout dans la formulation des bétons modernes (BAP et BHP). D'ailleurs, l'addition des fillers calcaires au ciment réduit le temps de prise et diminue la quantité d'eau, pour des taux de 5 à 28% [82].

Plusieurs résultats de recherche [83, 84] ont confirmé que les fines calcaires avec une surface spécifique comprise entre 500 et 1000 m²/kg apportent une nette amélioration de la fluidité et une réduction de seuil de cisaillement du mortier. De même, la viscosité et le seuil de cisaillement peuvent être améliorés en présence des fines calcaires. En effet, le seuil de cisaillement des mortiers commence à augmenter de façon linéaire pour des teneurs en particules fines supérieur à 16% [85]. D'autres études ont montré que le remplacement partiel de ciment par un volume égal de fillers calcaires, entre 5% à 20%, engendre une amélioration de la fluidité du béton à haute performance ayant un rapport E/C compris entre 0,35 et 0,41 [86].

Benabed et al. [72] affirment que le sable concassé contenant 10 à 15% de fines de calcaire peut être utilisé avec succès dans la production d'un mortier auto-plaçant avec une bonne propriété rhéologique. Selon les travaux de Yahia et al. [87], l'effet des fillers calcaires est principalement affecté par le rapport E/C et la teneur en fillers calcaires employée. Pour un rapport d'E/C donné, l'ajout des fillers calcaires, pour une certaine fourchette, n'a pas affecté la fluidité. En revanche, l'incorporation des fillers calcaires a entraîné une augmentation importante de la viscosité de mortier. En effet, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout des fillers calcaires contribue à diminuer la viscosité de la pâte de ciment, malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides, avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui reste tributaire du rapport E/C [88, 69].

Petit et al. [89] ont étudié l'effet des fines calcaires sur les propriétés rhéologique du mortier. Cinq rapports de fines sur ciment (F/C) ont été utilisés dans cette étude à savoir 24, 30, 38, 46 et 55%, avec un rapport E/C égal à 0.5 et un taux en superplastifiant (HRWRA) déterminé de façon à obtenir un étalement de 450 mm et ce pour tous les mélanges de mortier. Ils ont constaté une diminution du seuil de cisaillement et de viscosité plastique pour le mortier avec un taux de fillers calcaires élevé (F/C est égal 55%) que pour les mélanges de 24% et 30% de rapport F/C. Cependant, l'augmentation de la teneur en fines (F/C) de 24% à 55% a donné lieu à une demande croissante en superplastifiant (HRWRA) de l'ordre de 0.51% à 1.97% comme c'est indiqué dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Résultats des propriétés rhéologiques des différents mélanges du mortier [89].

Rapport F/C (%)	55	46	38	30	24
Superplastifiant –HRWRA- (%)	1.97	1.67	0.75	0.6	0.51
Seuil cisaillement (Pa)	4.5	5.8	9.6	10.8	11.6
Viscosité plastique(Pa.s)	0.2	0.5	1.1	1.3	7.6

2.3.3. Résistance à la compression

D'après une étude réalisée par Bonavetti et al. [71], la résistance relative à la compression des mortiers, avec un taux de fines calcaires approprié, est continuellement élevée par rapport aux mortiers sans fines calcaires avec le même rapport E/C. A l'âge de 7 jours le mortier contenant des fines calcaires affiche une augmentation de la résistance relative à la compression de 44% à 72% par rapport à celles des mortiers sans fines à 28 jours et plus. Kenai et al. [70] ont trouvé que le développement de la résistance à la compression par rapport au béton sans fines à 7 jours étant de 11.8%, alors qu'à 28 jours l'accroissement était de 9.4%. La résistance à la compression des bétons à base de sable de concassage dépend de la nature des fines, c'est-à-dire de leurs coefficients d'activité [74, 90].

Plusieurs travaux ont mis l'accent sur l'effet des fines calcaires sur la résistance à la compression du mortier et du béton. D'après l'étude menée par Benabed et al. [72], la résistance à la compression à l'âge de 3, 7 et 28 jours du mortier a augmenté jusqu'à un maximum pour les mélanges contenant des fines calcaires comprises entre 10% et 15%. Cependant, elle diminue rapidement lorsque le pourcentage de fines dépasse 15% (figure

2.4). Ceci est probablement en raison d'insuffisance de la pâte de ciment pour enrober toutes les particules des agrégats fins ce qui conduit par conséquent à une diminution de la résistance à la compression. En plus, pour les échantillons sans ou avec seulement 5% des fines calcaires, il n'y a pas suffisamment de particules fines pour combler tous les vides entre la pâte de ciment et les particules fines des granulats, ce qui engendre, donc, des valeurs de résistance à la compression plus faibles par rapport aux mélanges avec 10 et 15% du taux des fines calcaires. Par contre, Bederina et al. [91] ont constaté que la résistance à la compression du béton avec un taux de fillers d'environ 5% enregistre une valeur maximale à l'âge de 28 jours. Par ailleurs, elle diminue progressivement au-delà de ce taux.

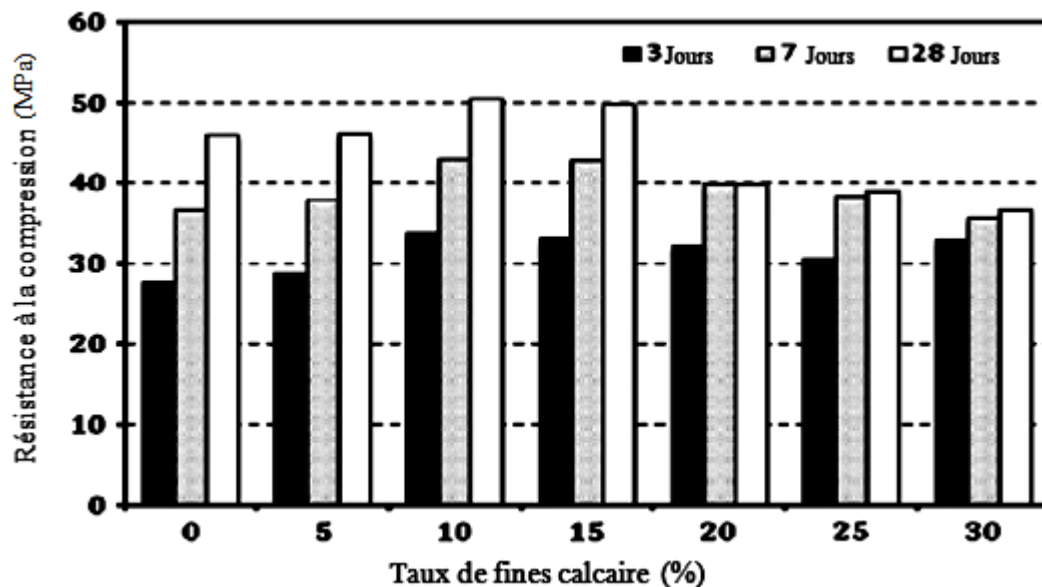


Figure 2.4: Résistance à la compression (3, 7 et 28 jours) du mortier composé avec différents taux de fines calcaires [70].

Selon les travaux de Sadhouari et al. [92] la résistance à la compression se caractérise par une augmentation avec le taux de fillers pour atteindre un optimum correspondant à 15% de fines. Au delà de ce pourcentage, une chute de résistance est enregistrée qui, toutefois, reste supérieure à celles relatives aux pourcentages de 5 et 10% de fillers à toutes les échéances. Dans le même contexte, Kenai et al. [70], ont conclu que l'incorporation des fines calcaires à un taux de 15% semble améliorer la résistance à la compression au jeune âge et à long terme. Cependant, pour 20% de fines, la résistance à la compression est comparable à celle du béton avec sable sans fines. Par ailleurs, certains auteurs [93; 94 et 95] ont montré que la finesse des fillers calcaires affecte la demande en

superplastifiant et mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges.

Joudi et al.[96] ont étudié l'influence du taux de fillers du sable de concassage sur les propriétés mécaniques du béton. Ces bétons sont fabriqués tout d'abord sans superplastifiant puis avec un superplastifiant de nouvelle génération. Ils ont trouvé tous les mélanges du béton avec et sans superplastifiant montrent une meilleure résistance à la compression, même pour les mélanges les plus riches en fillers. Pour une ouvrabilité donnée, la résistance à la compression peut atteindre un optimum lorsque le sable contient 12 % de fines pour les bétons courants et 6% de fines pour les bétons adjuvés. Or, les performances diminuent peu, au-delà de ces valeurs, notamment pour les bétons les plus fluides (figure 2.5).

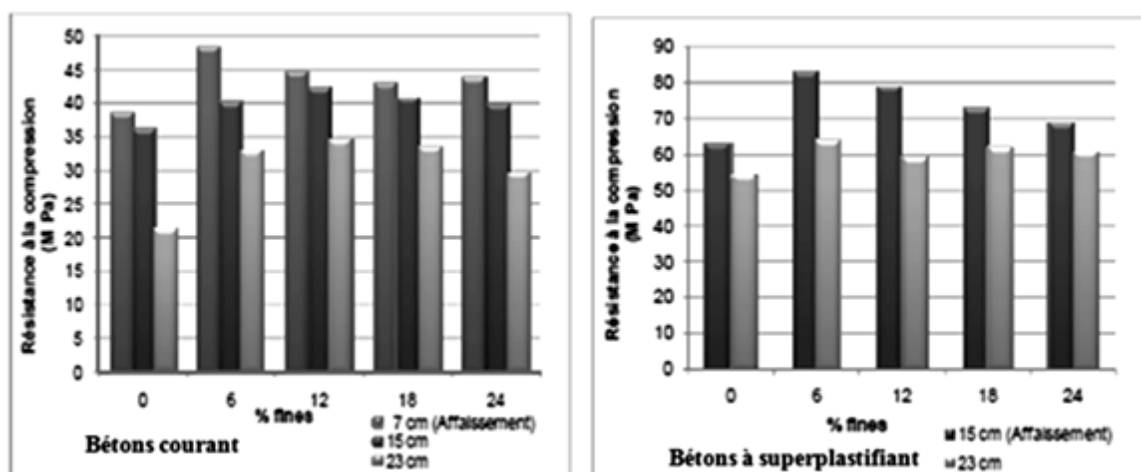


Figure 2.5: Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers [96].

2.3.4. Résistance à la traction par flexion

L'incorporation des fines au mélange du mortier améliore la résistance à la traction par flexion pour tous les taux et à tous les âges [71]. Selon Joudi et al. [96], l'incorporation de fines calcaires à un taux de 12% semble améliorer la résistance à la traction du béton par rapport au béton sans fines calcaires (figure 2.6). Les fillers calcaires ajoutés en quantité n'altèrent pas significativement la résistance à la traction. Le développement de résistances à la traction est semblable à celui observé pour les résistances à la compression des mortiers correspondants; l'augmentation était plus claire au jeune âge [73, 71 et 96].

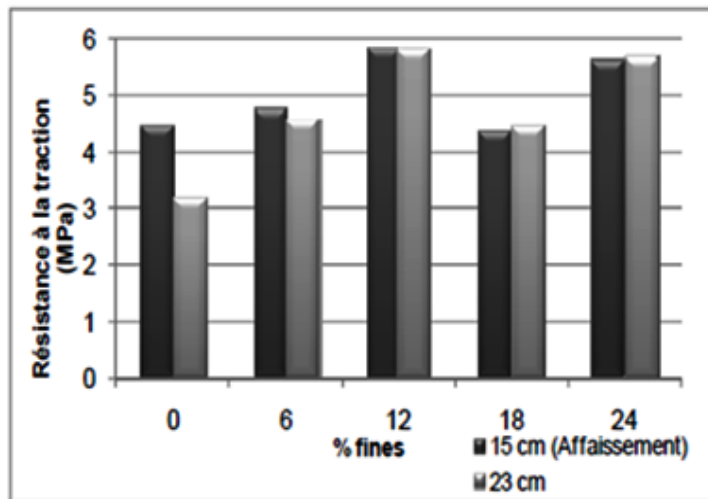


Figure 2.6: Variation de la résistance à la traction des bétons pour différents affaissement [96].

Alshahwany [97], a étudié l'influence des fines calcaires dans le sable sur la résistance à la traction du béton. Les taux des fillers calcaires substitués au sable utilisé lors de cette étude étaient de 0, 10, 20, 30, 40 et 50% avec un rapport eau/ciment de 0.57 (figure 2.7). Il a conclu que la résistance à la traction du béton peut être améliorée au remplacement partiel du sable par des fillers calcaires. La résistance des bétons commence à augmenter de façon linéaire pour atteindre un optimum correspondant à 20% de fines. Au-delà de ce pourcentage, on enregistre une chute progressive de résistance.

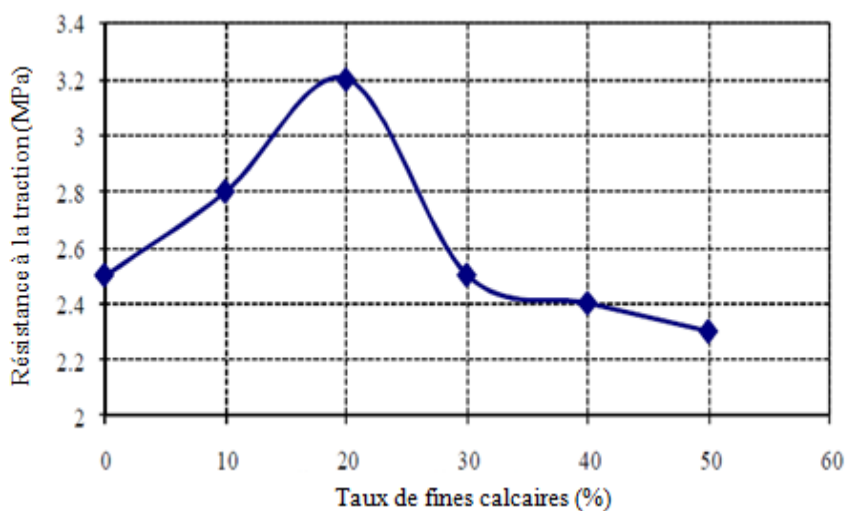


Figure 2.7: Influence de taux de remplacement de filler calcaire sur la résistance à la traction du béton [97].

2.3.5. Module d'élasticité

D'après une étude menée par Donza et al. [49], sur l'influence de trois types de sables concassés (granite, calcaire et dolomie) en comparaison avec le sable naturel sur le module d'élasticité du béton, l'évolution du module d'élasticité est étroitement liée à la texture et à la forme du granulat fins, lorsque le rapport de pâte sur le volume des granulats et la nature des agrégats grossiers sont les mêmes. Le module d'élasticité tend d'environ vers 40 GPa à l'âge de 360 jours. Cependant, le module d'élasticité du sable concassé est inférieur quelque soit l'origine des fines, notamment au jeune âge. Ce comportement peut être attribué au volume important des vides de sable concassé. En outre, le sable de granit avec la même teneur en ciment présente le même effet, mais le sable de dolomite présente un module d'élasticité plus bas à tous les âges [49].

Benachour [98] a étudié l'effet des fillers calcaires sur les propriétés des mortiers. Les résultats représentés sur la figure 2.8 montrent que le mortier confectionné avec 15% d'ajout de fillers calcaires enregistre une amélioration du module d'élasticité par rapport au mortier sans fillers. Une augmentation de 2.8% à partir de 15% a été enregistrée. Cependant, une diminution progressive par palier qui varié entre 8.57 à 16.3% a été observée. Cela à été liée à la variation du rapport E/C et la porosité.

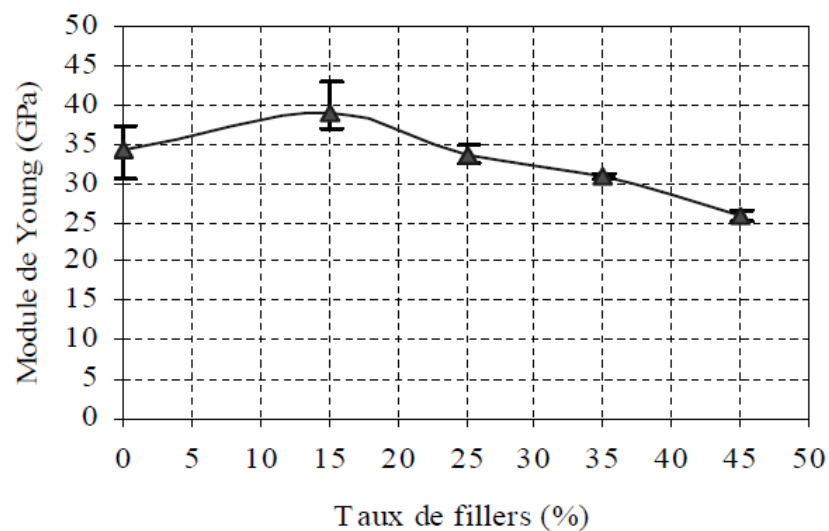


Figure 2.8: Evolution du module de Young des mortiers élaborés en fonction du taux de fillers [98].

2.3.6. Retrait

D'après les travaux de Bederina et al. [91], le retrait du béton est plus faible avec un taux de fillers calcaires de 5%, au-delà de ce pourcentage le retrait commence à augmenter. De plus, ils ont noté aussi que pour tous les taux de fillers calcaires, le retrait des bétons

calcaires est acceptable et ne dépasse pas les valeurs recommandées pour le béton courant. De même, Bonavetti et al.[71] ont trouvé que le mortier contenant plus de 10% de fines calcaires présente des retraits plus élevés par rapport aux mortiers sans fines ou le mortier avec 5% de fines seulement (figure 2.9). Ceci peut être attribué au fort pourcentage de fines dans le sable ce qui favorise le besoin en eau. D'autres chercheurs [90, 99] ont expliqué cet accroissement du retrait des mortiers contenant plus de 10% de fines calcaires par la formation des carboaluminates ou du retrait élevé de carbonatation.

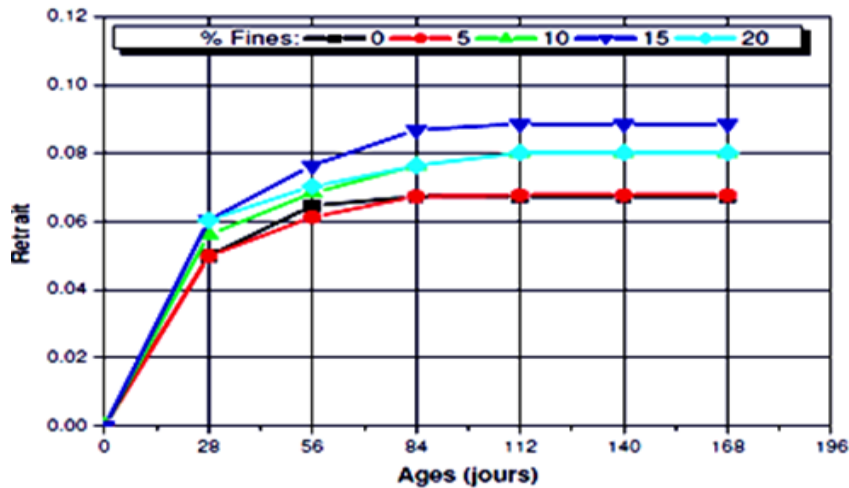


Figure 2.9: Retrait des mortiers avec fines en fonction de l'âge [71].

2.3.7. Durabilité

D'après une étude réalisée par Kenai et al. [101], la pénétration des ions-chlorure et la perméabilité au gaz des bétons augmentent avec l'augmentation du pourcentage des fines calcaires. Cependant, les bétons à 20% de fines présentent une pénétration des ions-chlorure et une perméabilité élevées par rapport aux autres mélanges (figures 2.10 et 2.11).

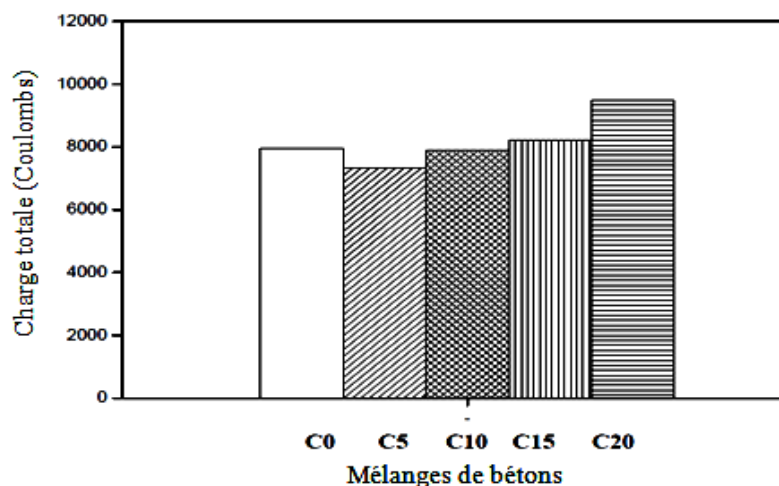


Figure 2.10: Charge totale pour mélanges de béton contenant diverses quantités des fines calcaires à 90 jours. [101]

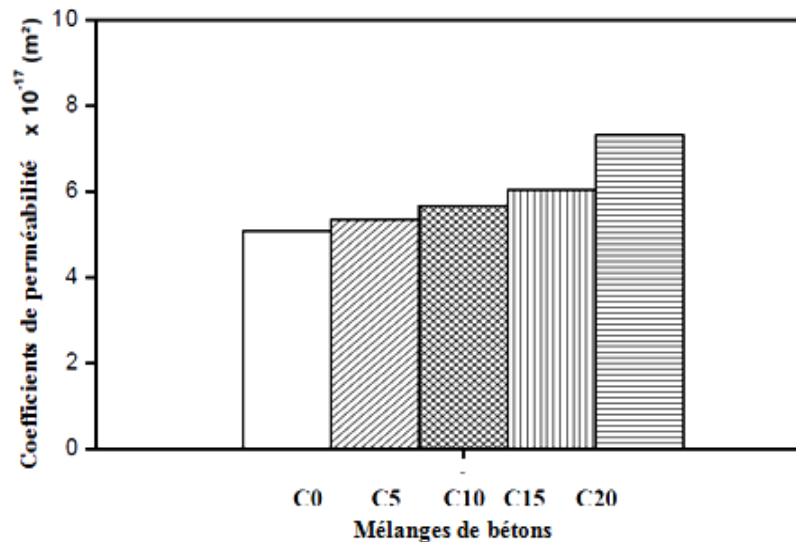


Figure 2.11: Les valeurs des coefficients de perméabilité pour différents mélanges de béton contenant diverses quantités des fines calcaires à 90 jours [101].

Pour l'absorption d'eau par capillarité, Kenai et al. [101] ont démontré qu'après 24 heures, l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la teneur des fines calcaires. Cette augmentation d'absorption d'eau varie entre 6 à 11% pour le béton contenant 15 à 20% de fines de calcaire. Cependant, ils ont constaté une légère baisse de 3% pour le mélange de béton avec 5% de fines calcaire. Ce résultat est similaire comparativement aux résultats d'autres chercheurs [102, 103] pour 64 minutes d'absorption d'eau.

2.3.8. Pourcentage de l'air occlus

Il s'agit du pourcentage minimum de l'air occlus dans les mélanges du béton contenant des fines calcaires. Il voit son intérêt à son rôle primordial pour atteindre des résistances plus élevées. Selon une étude menée par Sadhouari et al [92], le pourcentage de l'air occlus diminue en fonction du pourcentage des fines pour les bétons, l'optimum est atteint entre 10 et 15%. Une reprise remarquable de l'air occlus a été observée lorsque le teneur en fines est égal à 20%. Ce résultat est en concordance avec les résultats obtenus par Ferkous et al. [104].

2.3.9. Densité réelle

D'après les travaux de Sadhouari et al [92], la densité réelle du béton augmente rapidement pour les taux de fines allant de 0% à 15%. Au delà de 15% une diminution a été observée pour les deux types de bétons, avec les granulats de deux carrières différentes. Ces résultats sont expliqués par les fillers calcaires qui densifient la pâte du béton frais en réduisant les pores (modification de la microstructure). Ceci confère au béton frais un

pouvoir de rétention d'eau et lui permet de s'opposer au ressuage et de garantir une cohésion afin d'assurer le maintien de son homogénéité (absence de ségrégation).

D'après les travaux de Benachour [77], la densité du mortier arrive à son maximum pour un taux de fillers calcaires de 15% alors que la porosité est au minimum pour le même taux d'ajout de fillers calcaires (figures 2.12 et 2.13). Cependant, pour un taux supérieur à 15%, on a observé une chute progressive de la densité par palier de 2.7 à 2.9% et une augmentation de la porosité jusqu'à une valeur double. Pour les taux de fillers élevés et vu que leur surface spécifique est importante, de nouveaux pores sont créés en engendrant une augmentation de la porosité et une diminution de la densité. Les explications données confirment que les fillers commencent en premier lieu par remplir les vides autour des grains de sable, jusqu'à l'optimum. Par contre, pour une grande quantité de fillers, les vides étant complètement remplis d'additions et les fillers occupent la place des grains de sable, d'où une diminution de la proportion de sable, et par conséquent de la densité du mélange.

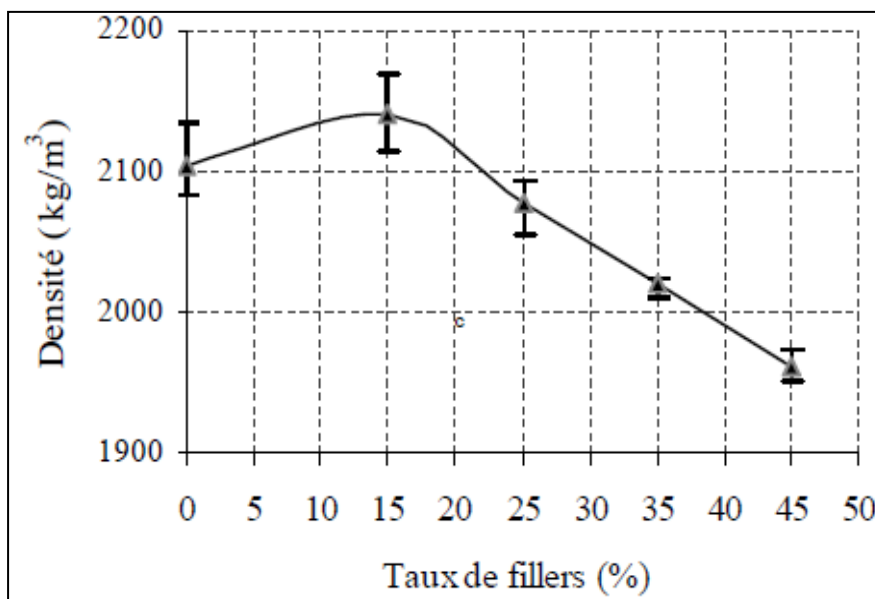


Figure 2.12 : Evolution de la densité en fonction du taux de fillers [77].

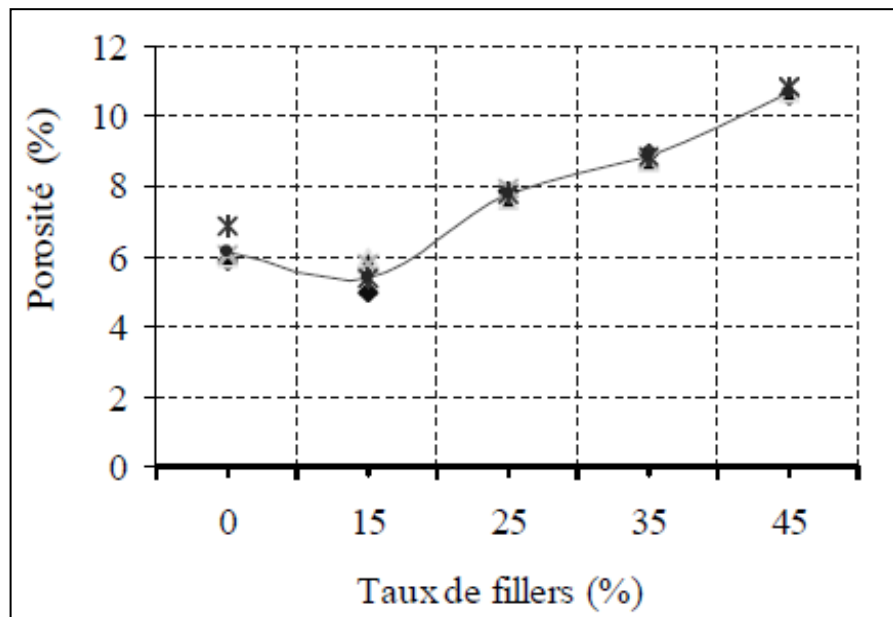


Figure 2.13: Evolution de la porosité de mortier en fonction du taux de fillers [77].

2.4. Travaux sur le sable de concassage

Dans ce paragraphe on présente quelques travaux de recherches concernant l'effet de l'utilisation du sable de concassage sur les propriétés du béton et du mortier et ce à l'état frais et durci.

2.4.1. Travaux sur le mortier

Mahzus et al. [105] ont étudié l'effet de l'utilisation de la poudre de pierre concassée dans la composition du béton, comme une substitution du sable naturel, sur la résistance mécanique. Ils ont abouti au constat que la résistance à la compression des mortiers, contenant de la poudre de pierre concassée, est plus élevée par rapport à celle des mortiers composés uniquement avec le sable naturel. Ainsi, à l'âge de 7 et 28 jours la résistance du mortier du sable naturel est respectivement de l'ordre de 22.84 et 15.4% inférieure à celle du mortier avec de la poudre de pierre concassée. Selon les résultats de Sivakumar et al. [106], la résistance à la compression à 28 jours du mortier à base du sable concassé est 11.8% plus élevée que celle du mortier avec du sable naturel. Ce comportement a été expliqué par la forme et la texture des particules de sable concassé qui produisent une meilleure liaison entre la pâte et les particules du granulat, ce qui conduit à une amélioration de la résistance [49].

D'après une étude sur l'influence du type de sable sur la chaleur d'hydratation du mortier réalisée par Mezaine et al. [60], le mortier avec du sable concassé génère une chaleur d'hydratation supérieure à celle avec un sable normalisé. La chaleur d'hydratation se produit plus tôt pour les mortiers contenant du sable concassé comme le montre la figure 2.14. Ceci a été expliqué par la présence des fines calcaires dans le sable concassé, qui jouent le rôle de germes dans l'hydratation des grains de ciment et forment d'autres sites de nucléation pour soutenir la formation des hydrates. De ceci, l'emploi du sable concassé implique une accélération de l'hydratation du ciment en présence de calcaire finement broyé [60].

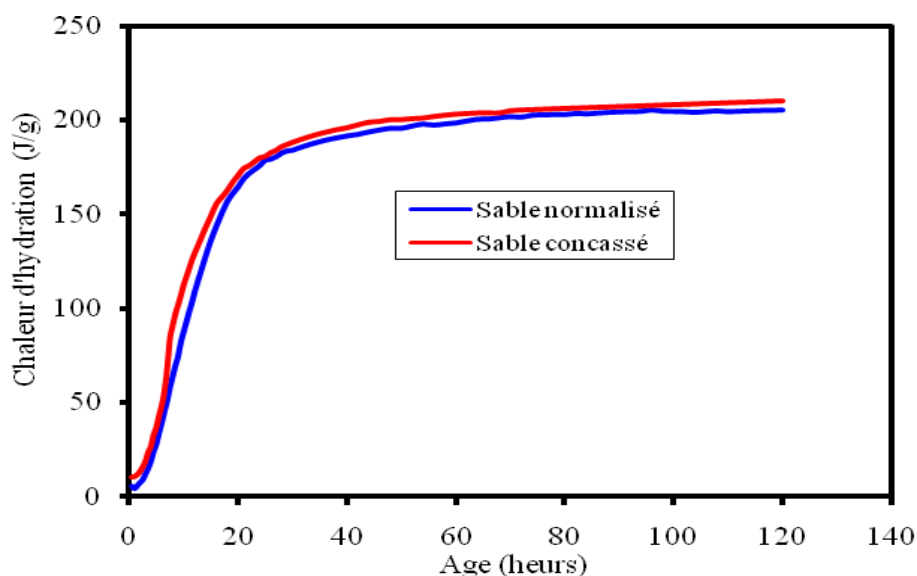


Figure 2.14 : Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment calcaire avec le sable normalisé et le sable concassé [60].

Selon les travaux de Venkatarama [107], les mortiers produits avec un sable artificiel présentent une meilleure ouvrabilité avec un faible rapport E/C. Le mélange du mortier peut atteindre un étalement de 100% avec un rapport E/C égal à 1.4 en utilisant le sable artificiel et à 1.75 pour le sable de rivières (figure 2.15). Par ailleurs, la résistance à la compression du mortier avec un sable artificiel à 7 et 28 jours double par rapport au mortier à base de sable de rivière.

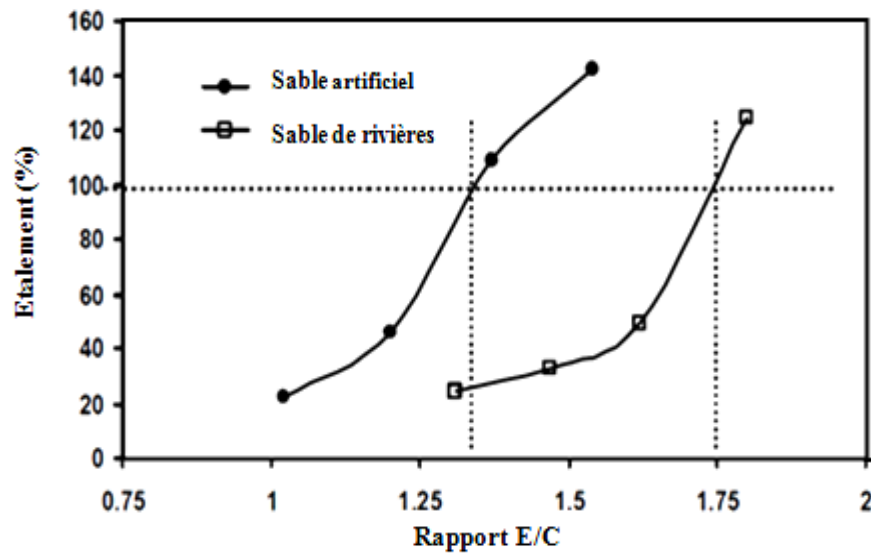


Figure 2.15: Ouvrabilité des mortiers en fonction de rapport E/C [107].

La résistance à la compression des maçonneries est de 3.35 MPa et 4.38 MPa respectivement pour le mortier avec le sable de rivière et le sable artificiel. Presque 30% d'augmentation de résistance de maçonnerie du mortier avec de sable artificiel après réalisé d'essai de compression comme représenté sur la figure 2.16. Le module de maçonnerie, quand à lui, est de 1200 MPa et 500 MPa pour le mortier du sable artificiel et de rivière respectivement [107].



Figure 2.16: Teste de compression de maçonneries [107].

2.4.2. Travaux sur le béton

D'après Wakchaure et al. [108], la résistance à la compression du béton à base de sable de concassage augmente de 7.72% à l'âge de 7 jours et de 3.98% à 28 jours par rapport au béton avec le sable de rivière. Le sable concassé de forme irrégulière et les particules fines qui remplissent le vide entre les particules grossières donne un béton plus solide en contribuant à l'amélioration de sa résistance par rapport à celui avec le sable naturel. Le gel de silicate de calcium-hydrate (C-S-H) pénétrant dans les micropores des granulats, lui permettent de traverser facilement le sable concassé dû à la surface rugueuse des particules, ce qui se traduit par plus de résistance [108]. Des études comparatives à l'aide de sable concassé et naturel sur le comportement mécanique du béton ont montré que la résistance à la compression du béton du sable de concassage est supérieure à celle du béton de sable naturel avec une augmentation comprise entre 7% à 33% [109].

Selon les travaux de Balapgol et Kulkarni [110], l'utilisation du sable concassé comme un substitut au sable naturel engendre une amélioration significative de la résistance à la compression. Avec une évolution de 19,4% à 40,4% à 7 jours et de 8,3% à 25,9% à 28 jours. Ceci est accompagné par une augmentation de 1 à 5% de résistance à la flexion. En plus, Venkatarama [107] a aussi confirmé que la résistance à la compression du béton avec un sable artificiel est 6 à 9% plus élevée que celle du béton avec un sable de rivière, et 12 à 15 % plus élevée concernant la résistance à la flexion. De même, Sivakumar et al. [106] ont montré qu'à 56 jours de durcissement, la résistance à la compression du béton à base de sable concassé a été 17.45% plus élevée que celle du béton de référence et 15.25% plus élevée par rapport à la résistance à la traction. D'ailleurs, Shaikh et al. [111] ont conclu que les mélanges avec du sable artificiel donnent toujours une résistance plus élevée que les mélanges avec du sable naturel, cela est dû aux particules de sable artificielle qui fournissent une meilleure liaison avec le ciment contrairement à la partie arrondie du sable naturel. Ces résultats sont en conformité avec ceux trouvés par Balkrishna et al. [112].

D'après l'étude menée par Makhlofi et al. [113], sur l'effet du comportement mécanique du béton calcaire avec superplastifiant (BCS) et sans superplastifiant (BCNS), la résistance à la compression du béton avec superplastifiant est supérieure que celle du béton sans superplastifiant, et la résistance augmente avec l'augmentation de dosage en ciment (tableau 2.2). En plus, le béton produit à partir des granulats concassés a un

comportement mécanique qui se rapproche de celui des bétons fabriqués par des granulats alluvionnaires siliceux et silico-calcaires [113]. De même, l'utilisation du sable concassé comme agrégat fin au béton BHP donne une résistance mécanique similaire ou meilleure que celle du béton avec du sable naturel [49].

Tableau 2.2: Résistance à la compression pour un affaissement $A=9$ [113].

Dosage en ciment (kg/m ³)	Rc28 (MPa) (BCNS)	Rc28 (MPa) (BCS)
250	9.41	30.65
350	16.39	38.12
450	22.64	44.04

Ravina [114] a souligné que la forme des particules de sable de concassage est plus anguleuse avec une texture plus rugueuse, et généralement fiable et plus allongée que celle du sable naturel. D'ailleurs, la combinaison entre la cendre volante et le sable concassé donne un bon béton par rapport au béton avec sable concassé seul. D'autre part, Kim et al. [115], ont observé que l'énergie de rupture du béton a été peu influencée par le type de fine d'agrégat. L'énergie de rupture du béton du sable concassé est légèrement supérieure à celle du béton du sable de rivière en raison des fines incluses dans le sable concassé qui tendent à améliorer la cohésion entre la pâte de ciment et les agrégats. Cependant, la résistance à la compression du béton de sable concassé reste presque la même que celle d'un béton avec le sable de rivière ou le sable de granit concassé [115].

2.5. Effets de substitution du sable naturel par le sable de concassage

Dans ce qui suit, quelques travaux de recherches concernant l'effet de substitution partielle ou totale du sable naturel par le sable de concassage sur les propriétés du béton et du mortier, à l'état frais et durci, sont mises en relief.

2.5.1. Ouvrabilité

La substitution du sable naturel par le sable de concassage influence considérablement le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. Les résultats représentés sur la figure 2.17 montrent que l'incorporation du sable du désert (SD) avec le sable de concassage (SC) jusqu'à 15 % améliore les paramètres rhéologiques de l'ouvrabilité des BAP pour tout les dosages en superplastifiant (SP). Au delà de cette teneur en sable du désert (SD) les BAP se comportent comme des bétons ordinaires [116].

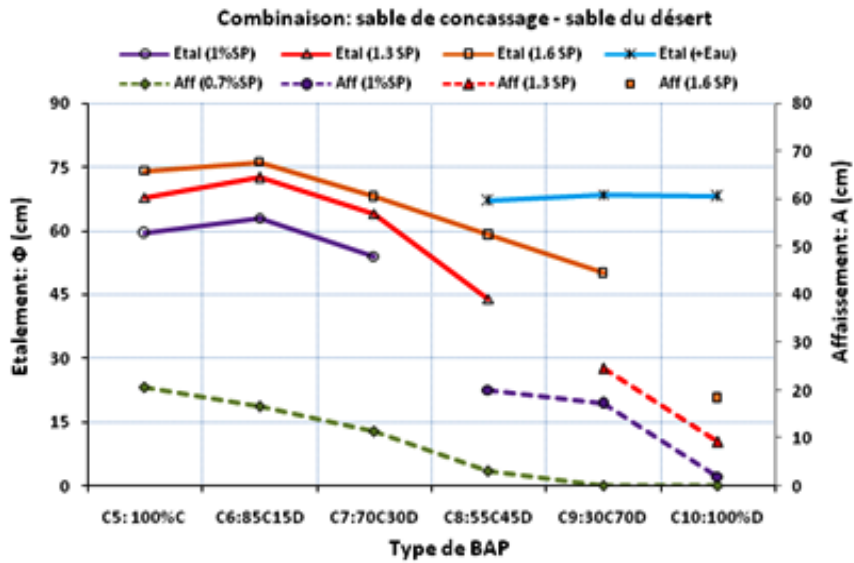


Figure 2.17: Étalement au cône d'Abrams des BAP [116].

En plus, Ltifi et al.[117] ont étudié l'effet de la substitution partielle ou totale du sable alluvionnaire par le sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton. Ils ont constaté que l'ouvrabilité du béton diminue lorsque le rapport E/C diminue et la quantité de l'eau de gâchage augmente en passant du sable siliceux vers celui concassé. Cela est dû à la présence d'un important pourcentage de fines dans les sables de concassage. Cependant, le mélange de deux sables roulé et concassé enregistre une ouvrabilité intermédiaire. Par contre, Lohani et al. [118] trouvaient que l'ouvrabilité augmente avec l'augmentation du contenant de la poussière de carrière dans le béton, pour un rapport E/C égal à 0.55. Les valeurs de l'ouvrabilité sont 37, 45, 50, 54 et 60 mm respectivement pour les mélanges de 0, 20, 30, 40 et 50% de substitution du sable naturel par la poussière de carrière (figure 2.18).

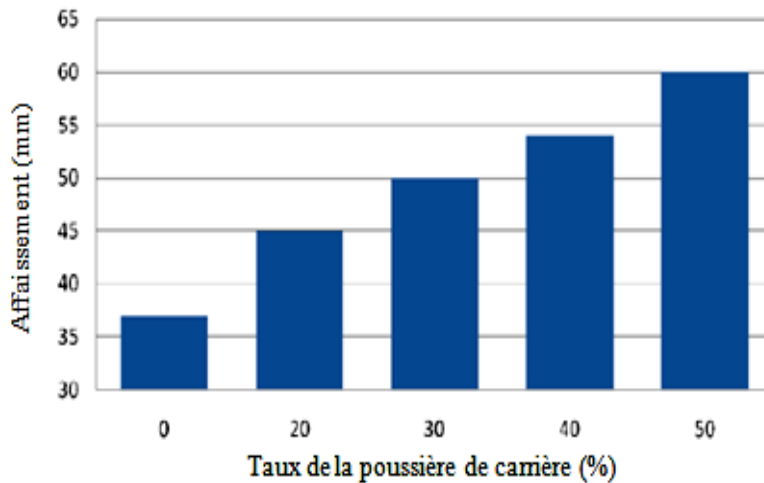


Figure 2.18: Variation d'affaissement du béton avec de la poussière de la carrière [118].

D'après les travaux d'Akout et al.[120], le béton du sable siliceux donne une bonne ouvrabilité avec un faible rapport E/C par rapport au béton avec le sable de concassage, mais le mélange des deux types de sable présente une ouvrabilité intermédiaire. Vinayak et al. [121], affirment que le sable naturel peut être remplacé par le sable artificiel jusqu'à un taux de remplacement maximum de 60% afin de produire un béton avec une ouvrabilité satisfaisante. Cependant, la combinaison du sable de concassage et du sable de rivière améliore, clairement, l'ouvrabilité du béton pour toutes les proportions. En revanche, l'affaissement a atteint un optimum pour 70% de sable de concassage [122]. Dans le même sillage, Bouziani [123] a rapporté que le béton auto-compactant composé de 80% du sable de concassage et 20% du sable naturel conduit à un affaissement élevé de 77 cm. L'utilisation du sable concassage à la place du sable de rivière provoque généralement une réduction de la demande en eau et de la demande en superplastifiant du mélange de béton [124].

Sungjoon [125] a étudié la fluidité du béton à haute performance avec différentes proportions de sable de concassage et de sable de mer. Trois différents pourcentages de cendre volante 0%, 10% et 20 % ont été utilisés. Il a été déduit que la demande de superplastifiant est plus significative, dès que le contenant de sable concassé (CS) dans le mélange augmente, sur tout dans le béton avec du sable concassé (CS) uniquement. Dans ce cadre, la capacité d'écoulement du béton à base de sable concassé diminue lorsque la teneur en cendres volantes augmente (figure 2.19).

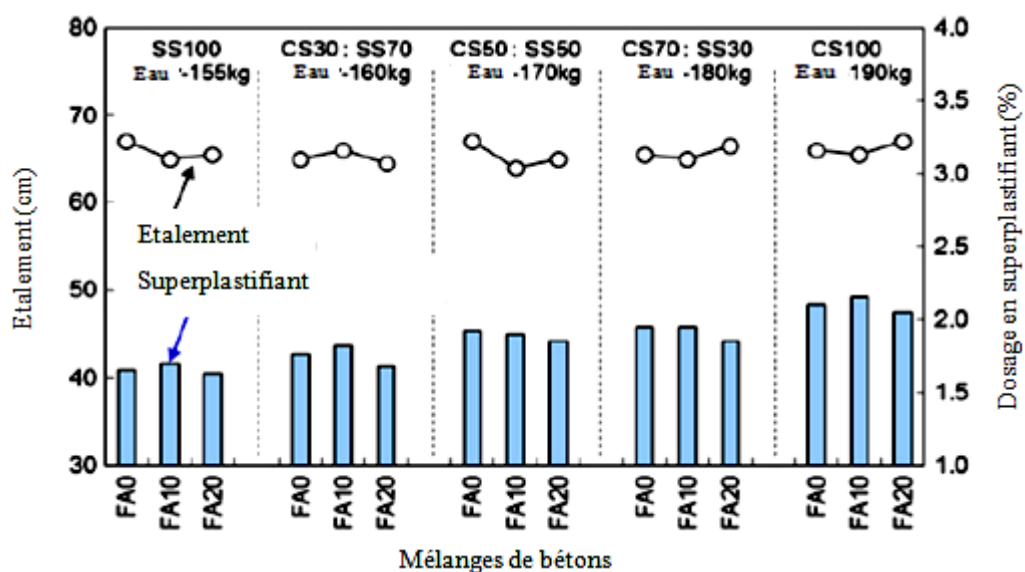


Figure 2.19: Étalement et le contenu de superplastifiant dans un béton contenant du sable concassé et de la cendre volante [125].

D'après une étude faite par Benabed et al. [72], la substitution du sable naturel par 75% de sable de concassage dans un mortier présente une ouvrabilité élevée de 295 mm d'étalement par rapport au mortier avec 50% et 25% de sable de concassage et le mortier témoin comme c'est indiqué dans la figure 2.20. De même, le mélange de mortier contenant 75% du sable de concassage et 25% du sable naturel présente une meilleure viscosité plastique (figure 2.21). Les résultats présentés par Tahar et al. [126] montrent que le béton avec 30% du sable recyclé manifeste une bonne ouvrabilité en raison de sa teneur élevée en fines qui provoque une augmentation de la compacité du mélange granulaire.

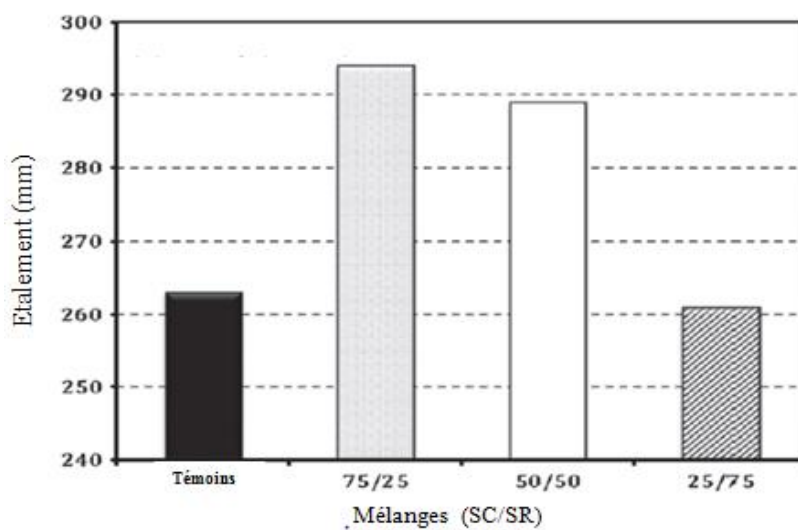


Figure 2.20: Ouvrabilité du mortier avec différents taux des substitutions [72].

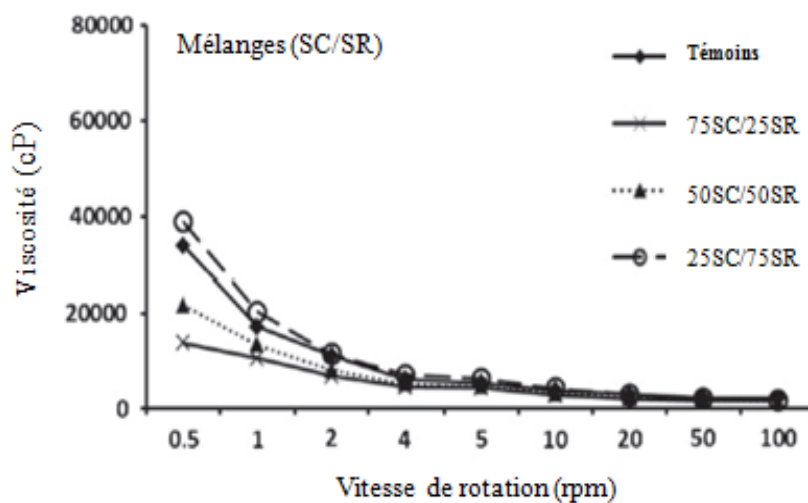


Figure 2.21 : Viscosité du mortier auto-plaçant avec différent taux de remplacement.[72]

2.5.2. Résistance à la compression

Les Le type de sable et le rapport E/C ont une grande influence sur le comportement mécanique du béton résultats de Kim et al. [115] montrent que le béton avec un mélange de deux sables concassés et un autre naturel avec des rapports E/C de 0.4, 0.5 et 0.6 enregistre une meilleure résistance à la compression par rapport au béton composé uniquement avec un sable naturel. Dans le même contexte, Sadhouari et al. [92] mettent en évidence que la vitesse d'évolution des résistances à la compression, des mortiers à base de sable corrigé formés de 40% du sable de mer et 60% du sable de carrière, est plus importante que celle du mortier témoin. En plus, les mortiers à base de sable corrigé ont affiché plus de 40MPa de résistance à 28 jours qui se stabilise au alentour de 45 MPa à 90 jours. D'autre part, Priyanka et al. [127] trouvaient que le remplacement de 50% de sable naturel par le sable artificiel, dans le mélange du mortier, présente une excellente résistance à la compression qui est plus élevée avec un rapport E/C égale 0.5. De même, Adams et al. [128] confirmaient que le remplacement du sable naturel par 50% du sable de concassage présente une meilleure résistance à la compression du béton.

Shanumugapriya et al. [129] ont étudié le remplacement partiel du sable naturel par le sable artificiel dans le béton à haute performance avec le fumé de silice. Ils ont montré que le remplacement partiel de ciment avec 5% de fumé de silice donne une résistance à la compression de 18.8%, supérieure que celle des bétons contenant 2.5% et 1.5% de fumé de silice. L'augmentation moyenne de la résistance à la compression du béton a été jugée de 11, 12, 18.8 et 5% respectivement pour des remplacements de 10, 30, 50 et 70% du sable naturel par le sable artificiel (figure 2.22). Par ailleurs, la résistance est optimale lorsque le taux de la substitution du sable naturel par le sable artificiel est 50%.

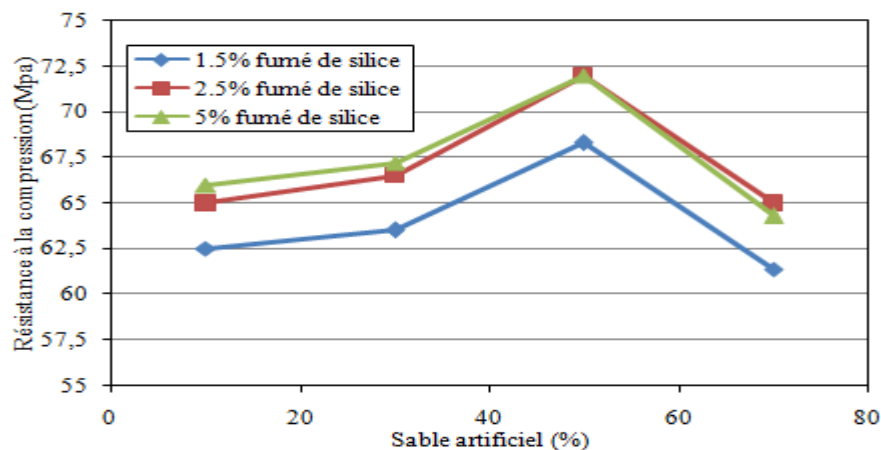


Figure 2.22: Résistance à la compression du béton à haute performance à l'âge de 28 jours en fonction de proportion de sable artificiel [129].

R'mili et al. [116], ont étudié l'effet de remplacement progressif du sable de concassage (SC) par le sable du désert (SD) sur le comportement à l'état durci des BAP, les résultats trouvés sont illustrés sur la figure 2.23. Ils ont montré que la résistance à la compression la plus élevée est obtenue pour les BAP à fort dosage en sable de concassage. L'augmentation du contenant de SD au mélange de BAP comme un substituant au SC réduit la résistance à la compression progressivement. Du coup, les résistances des BAP sont nettement meilleures que celles du béton ordinaire à base de 100% de (SC) ou 100% de (SD).

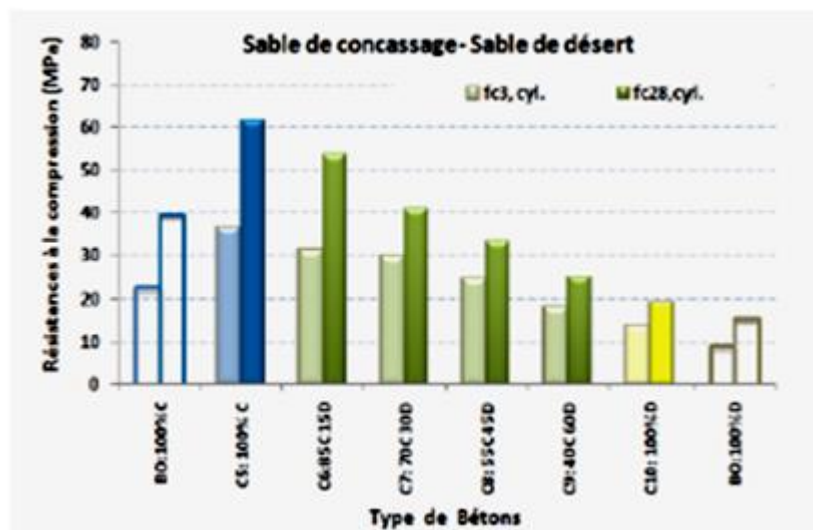


Figure 2.23 : Résistances à la compression des BAP retenus et des BO témoins [116].

Selon Akout et al.[120], le béton du sable de concassage (SC) donne une résistance à la compression inférieure que le béton avec un sable siliceux (SS) ou avec un mélange de deux sables pour tous les âges, mais reste à la même fourchette. Les bétons avec un dosage de ciment de 400 kg/m³ présentent une résistance supérieure que celles des bétons de dosage en ciment de 350 et de 300 kg/m³ (figure 2.24); ces résultats sont similaires que ceux trouvés par Ltifi et al. [117] pour un dosage en ciment de 350 kg/m³. Certains résultats montrent que, lorsqu'on remplace 10% de ciment par les fines de calcaire, les résistances à la compression à 28 jours restent proches de celle d'un béton de référence [130]. De même, une réduction de 5 à 7% a été trouvée lorsque le sable de concassage est utilisé dans le mélange de béton [126].

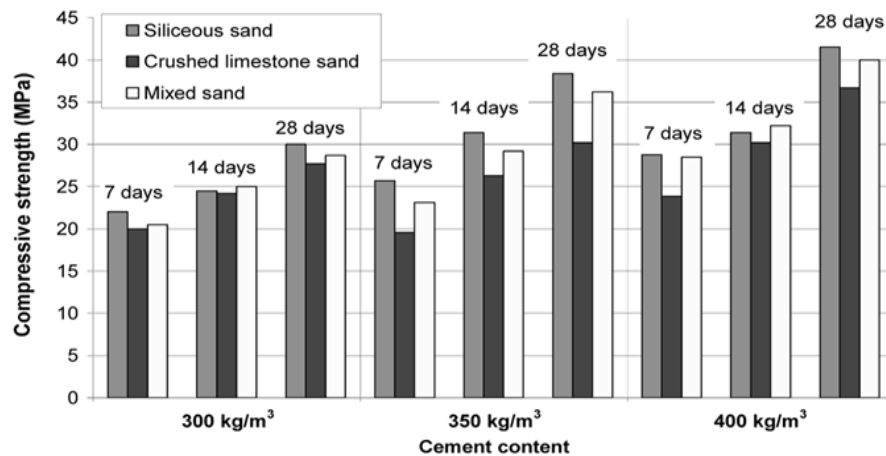


Figure 2.24: Résistance à la compression des bétons confectionnés par différents sables [120].

L'emploi de la poudre de pierres concassées (CRP) pour remplacer le sable naturel dans le mortier et le béton a été étudié par Nagabhushana et al. [131]. Ils ont trouvé que la résistance à la compression du mortier ou du béton avec 40% de remplacement de sable naturel par (CRP) enregistre une meilleure résistance. Plusieurs résultats de recherche [132, 121] ont confirmé que le sable naturel peut être remplacé par le sable artificiel jusqu'à un taux de remplacement maximum de 60% afin de produire un béton de résistance à la compression élevée. En outre, Omar et al. [133] ont analysé l'effet de pierres de calcaires sur la résistance à la compression du béton où trois taux de remplacement ont été utilisés; 25, 50 et 75% avec un dosage de ciment de 350kg/m³. D'après les résultats illustrés sur la figure 2.25, il est évident que l'utilisation de la pierre de calcaire fait augmenter la résistance à la compression du béton près de 6%, 13 et 8% pour taux de remplacement de 25% et de 10, 12, 11% pour taux de remplacement de 50% respectivement à 7, 28 et 90 jours par rapport le béton témoin.

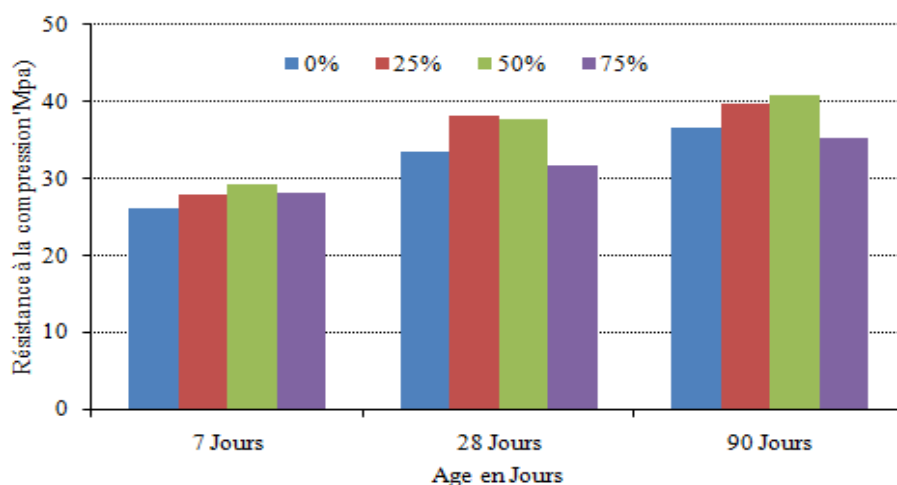


Figure 2.25: Variation de la résistance à la compression du béton avec divers taux de pierre calcaire concassé [133].

D'après les travaux de Sangjun [125] sur la résistance du béton à haute performance avec différentes proportions de sable de concassage, la résistance à la compression du béton composé de 70% et 100% du sable de concassage à été augmentée en moyenne de 1.39% et 4.64%. Cependant, l'ajout de la cendre volante dans le mélange du béton augmente la résistance à la compression. Bhikshma et al. [134] trouvent que la résistance à la compression a augmenté d'environ de 20% pour le béton avec de la poussière de pierre concassée par rapport au béton classique. Le remplacement du sable naturel par la poussière de pierre à des taux de 75% présente une meilleure résistance à la compression. Selon Anita et al. [135], la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de taux de la poussière de carrière au mélange du béton pour les deux dosages en superplastifiant 0.5% et 1%. Les bétons contenant 1% en superplastifiant donnent une résistance à la compression plus élevée que les autres, l'augmentation de la résistance à la compression est de l'ordre de 71% pour un béton contenant 100% de la poussière de carrière et ayant un dosage de superplastifiant de 1% par rapport au béton témoin (tableau2.3).

Tableau 2.3: Résistance à la compression de béton avec différents pourcentage de poussière de carrière [135].

Taux de remplacement de la poussière de carrière	Résistance à la compression 0.5% de Superplastifiant (MPa)	Résistance à la compression 1% de Superplastifiant (MPa)
0	27.0	28.0
10	27.9	29.6
20	29.5	31.2
30	31.0	33.4
40	32.7	34.9
50	34.5	38.0
100	43.0	48.0

D'après Bederina et al. [136], la résistance mécanique augmente avec l'augmentation de taux de remplacement du sable de rivière par le sable de concassage (figure 2.26). A 180 jours, le mortier (C4) complètement composé du sable de concassage donne une résistance plus élevée (41Mpa). Ceci est dû à la forme angulaire des grains du sable de concassage qui rend le mélange de mortier plus compact et permet de réduire la propagation de la fissure dans ce dernier. Par contre, la fissure est plus longue et sinueuse dans le cas des grains de sable de rivière qui sont caractérisés par une forme arrondie.

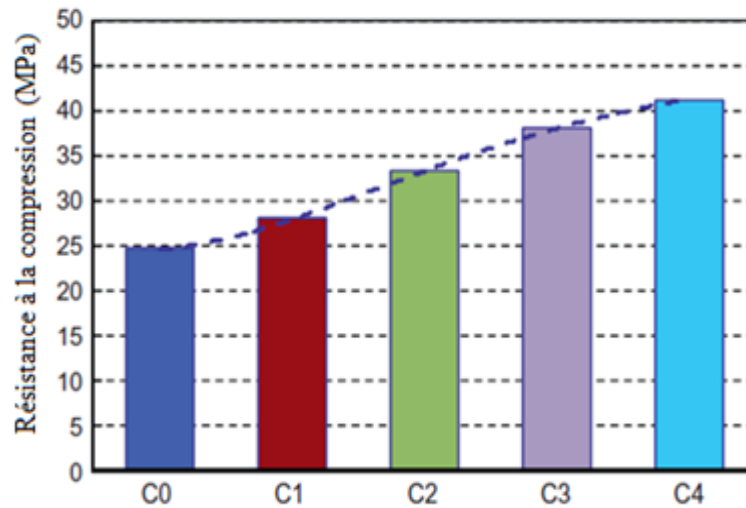


Figure 2.26: Résistance de compression de béton a 180 jours [136].

2.5.3. Résistance à la traction

Les études de l'effet du sable concassé comme un remplacement du sable naturel sur la résistance à la traction de béton ou de mortier sont nombreuses. La résistance à la traction du béton augmente avec l'augmentation du taux de remplacement du sable naturel par la poussière de carrière [135]. D'après Jadhav et al. [132], le meilleur résultat pour une résistance à la traction est 2.24MPa correspondant à 60% de taux de remplacement du sable naturel par le sable de concassage. Par contre, Nagabhushana et al. [131] ont montré que le mélange du mortier au béton avec 40% de remplacement du sable naturel par la poudre de pierre concassée (CRP) engendre une résistance à la traction la plus élevée. Tandis que Adams et al. [62] ont trouvé que le taux de 50% de substitution présente une meilleure résistance. Selon Kim et al. [115], le béton du sable mixte, sable concassé et sable naturel, avec un $E/C=0.4$ donne une meilleure résistance à la traction que celle du béton avec un seul sable. De plus, lorsque 20% de sable de rivière a été remplacée par des fines de granite concassé la résistance à la traction du béton atteint une valeur maximale [136].

2.5.4. Résistance à la flexion

D'après une étude menée par Jadhav et al. [132], le meilleur résultat pour une résistance à la flexion (6.59MPa) correspond à 60% de taux de remplacement du sable naturel par le sable de concassage. Shanumugapriya et al. [129] ont montré que la résistance à la flexion du béton à haute performance augmente avec l'augmentation du pourcentage de la fumée de silice dans le ciment. Pour un béton contenant 50% de sable

artificiel, la résistance est optimale. Cependant, le taux d'augmentation de la résistance à la flexion est de 13.2% à l'âge de 28 jours pour le béton avec 50% de sable artificiel et 5% de fumée de silice. En plus, la résistance à la flexion est plus élevée pour le béton composé de 100% de la poudre de pierre concassée comme une substitution du sable naturel, avec un développement de résistance à la flexion de l'ordre de 162% par rapport au béton de sable naturel [135].

2.5.5. Module d'élasticité

D'après une étude menée par Lohani et al. [118], le module d'élasticité du béton diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du sable par la poussière de carrière. Les mélanges M₂ (20%), M₃ (30%), M₄ (40%) et M₅ (50%) avec divers taux de remplacement présentent respectivement une réduction de 1.68, 5.2, 8.4 et 13.7% à 28 jours par rapport au mélange de référence M₁ (0%) comme le montre le tableau 2.4. De même, Donza et al. [119] ont conclu que le béton contenant 75 et 100% du sable de granite concassé réduit le module d'élasticité que celui contenant 100% du sable naturel.

Tableau 2.4: Module d'élasticité des bétons pour différentes mixtures à base de sable de carrières [118].

Mixture	Module d'élasticité en MPa		
	Expérimental	théorique	Augmentation %
M ₁	32617	27613	15.3
M ₂	32067	29368	8.4
M ₃	30896	28062	9.1
M ₄	29861	27064	9.3
M ₅	28130	25439	9.5

2.5.6. Densité

D'après les travaux de Lohani et al [118], la densité du béton augmente avec l'augmentation du taux de remplacement du sable naturel par la poussière de carrière comme c'est représenté sur la figure 2.27. Ceci est attribué aux particules fines de la poussière de carrière qui remplissent les vides entre la pâte et les granulats dans le mélange du béton en le rendant plus compact et plus solide.

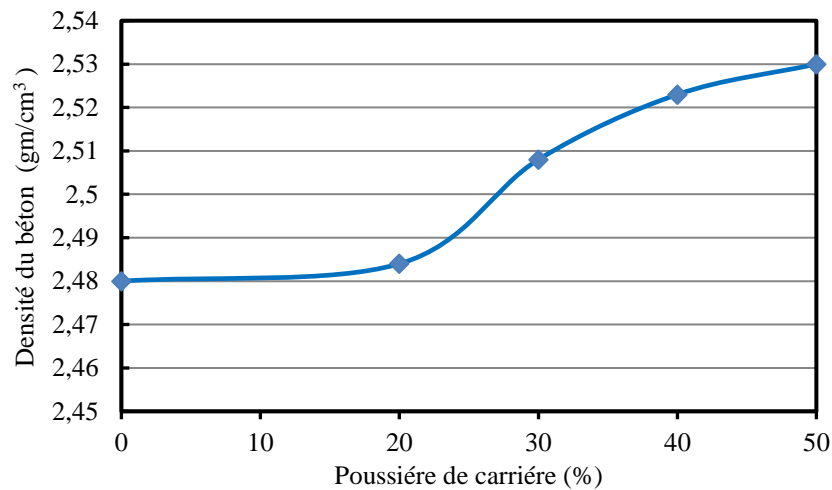


Figure 2.27: Densité du béton de différents taux de poussières [118].

2.5.7. Durabilité

Selon R'mili et al.[116], l'ajout de sable de désert (SD) ou du sable de concassage (SC) dans le béton auto-placent BAP diminue le coefficient de perméabilité au gaz. La valeur la plus basse correspond à un taux de 45% du sable de désert (figure 2.28). Les coefficients d'absorption par capillarité augmentent avec l'augmentation de la teneur en sable de désert et diminuent avec l'augmentation de la teneur en sable de concassage comme c'est montré sur la figure 2.29. Ils ont conclu que le sable concassé de calcaire représente une alternative intéressante au remplacement des sables alluvionnaires siliceux (roulés) pour la confection des bétons de tous genres.

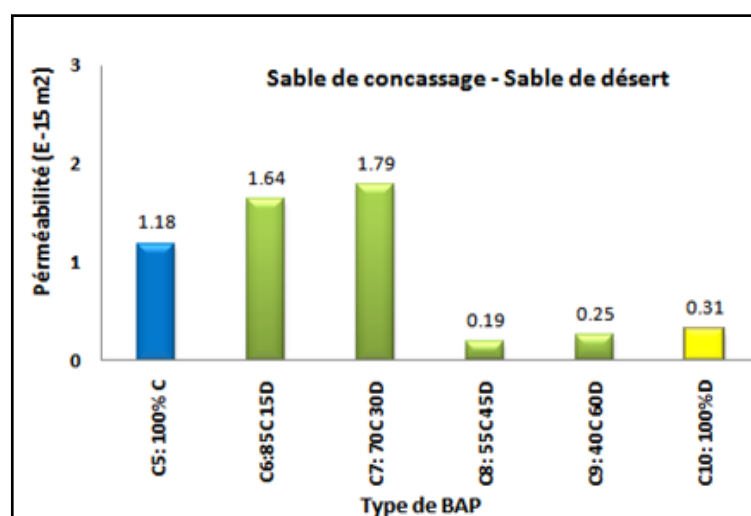


Figure 2.28: Coefficient de perméabilité des BAP à base de sable de concassage [116].

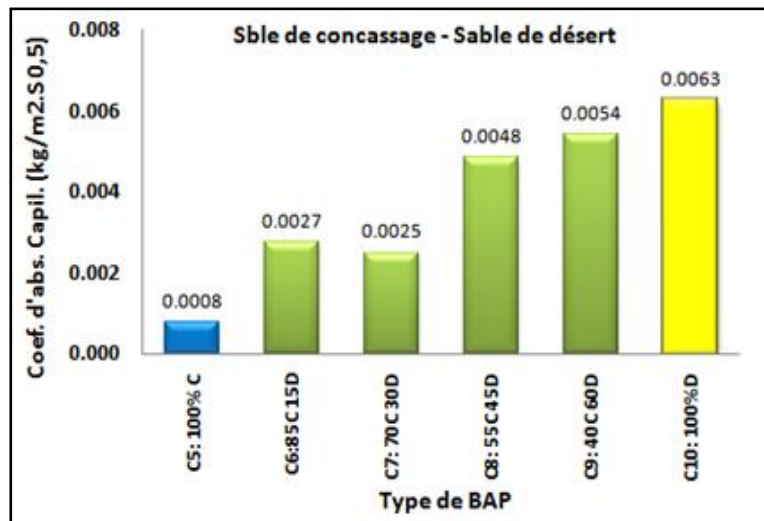


Figure 2.29: Coefficient d'absorption par capillarité des BAP à base de sable de concassage [116].

Shaikh et al. [111] se sont intéressés à la durabilité du béton de sable naturel et de sable artificiel. Ils ont remarqué que la perte de poids du béton avec du sable artificiel est sensiblement la même en ce qui concerne le sable naturel à 20, 40, 60 et 90 jours. Les deux bétons avec du sable artificiel et naturel sont modérés à la perméabilité du chlorure. Dans l'essai d'absorption d'eau, ils ont observé qu'après 24 heures de durcissement, l'augmentation du poids des deux bétons est moins de 3% ce qui signifie que les deux bétons sont moins absorbeurs. En outre, la perméabilité du béton diminue lorsque le pourcentage de remplacement de sable naturel par le sable concassé augmente [109].

D'après les travaux de Lohani et al. [118], l'absorption d'eau du béton est baissée pour un taux de remplacement de sable par la poussière de carrière de 20%, puis elle commence à augmenter pour un taux au-delà de 20%. D'autre part, ils ont immergé le béton à base de 50% de la poussière de carrière dans une solution à 5% de sulfate de magnésiums, une solution à 5% de chlorure de sodium et une solution d'acide chlorhydrique. Il en ressort qu'il n'y a pas de perte de résistance pour une immersion dans une solution de sulfate de magnésiums (Mg SO₄) et dans une solution de chlorure de sodium (NaCl) en comparaison avec l'immersion dans de l'eau normale. Pourtant, dans le cas d'acide chlorhydrique (HCl), il y a une perte de résistance en comparaison avec l'immersion dans l'eau normale. La perte de résistance augmente avec l'augmentation des jours d'immersion dans une solution de HCl comme illustré dans la figure 2.30.

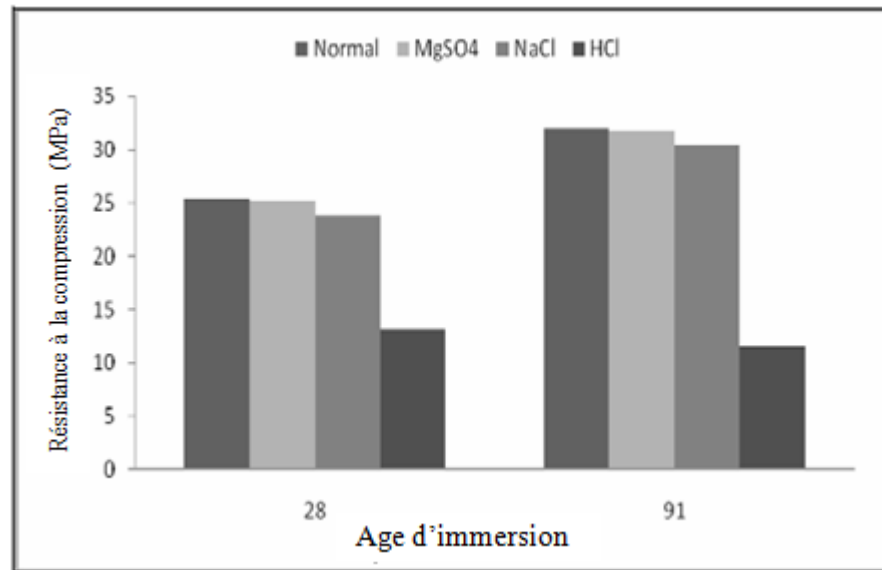


Figure.2.30: Variation de la résistance à la compression du béton en immersion avec des solutions différentes pour le mélange de 50% de la poussière de la carrière [118].

2.6. Conclusion

L'analyse bibliographique qui a mis exergue l'utilisation de sable de concassage aux mortiers et aux bétons a montré ce qui suit:

- Le béton ou le mortier composé par le sable de concassage présente des performances largement comparables à celles obtenues avec le sable naturel ouvrant ainsi la porte vers un emploi plus large de ces matériaux.
- Les fillers calcaires en provenance des sables de concassage améliorent de manière sensible les propriétés mécaniques des mortiers et bétons en raison des effets physiques et des activités chimiques de ces particules.
- L'incorporation des fines de calcaire du sable de concassage à un taux toléré, par plusieurs normes internationales et plusieurs chercheurs, améliore la résistance à la compression au jeune âge et à long terme. L'effet de ces fillers calcaires sur la performance de béton est très variable et dépend de plusieurs facteurs.
- Le sable de concassage contenant jusqu'à 15% de fines de calcaire peut être utilisé avec succès dans la production du béton ou du mortier avec une bonne propriété rhéologique et mécanique.

- La substitution partielle au totale du sable naturel par le sable artificiel (sable de concassage) améliore les performances rhéologiques et mécaniques du béton et du mortier. La forme, la taille et la texture des particules de sable de concassage ont une très grande influence sur la qualité de béton à l'état frais et durci.
- L'utilisation du sable de concassage constituera une solution idéale au problème d'approvisionnement et peut être adopté comme un matériau efficace de remplacement du sable naturel, à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable naturel.

Chapitre 03

Etude expérimentale

3.1. Introduction

L'objectif principal de cette partie expérimentale est d'étudier l'effet de l'utilisation du sable de concassage sur l'ouvrabilité, les paramètres rhéologiques et les résistances mécaniques d'un mortier normalisé. Le programme expérimental est décrit par la présentation des matériaux utilisés, le matériel d'essais et les démarches techniques suivies pour faire des mesures fiables et représentatives.

3.2. Programme expérimentale

Le programme des essais est effectué au niveau du laboratoire Géomatériaux (LaG) de l'université de Chlef. L'objectif est de déterminer la variation des propriétés rhéologiques et mécaniques des mélanges du mortier contenant différents taux de remplacements du sable naturel par le sable de concassage tels que 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100%.

Pour se faire, deux types de sable ont été utilisés, un sable naturel d'oued ras désigné (SN) et un sable de concassage de la carrière d'Oued Fouda (Chlef) désigné (SC). Un ciment composé CEM II, nommé C, provenant de la cimenterie de Chlef et contenant 10% de calcaire a été utilisé pour la confection de tous les mortiers. Pour contrôler la maniabilité du mortier, on a utilisé un superplastifiant *Médaplast (40)* désigné (SP) avec trois rapports E/C (0,4, 0,5 et 0,6). Avant l'utilisation, ces deux sables ont été caractérisés conformément aux normes en vigueur pour déterminer leurs caractéristiques telles que la granulométrie, l'équivalent de sable, la masse volumique, etc.

Pour l'essai d'ouvrabilité et pour chaque mélange du mortier préparé, on varie le dosage en superplastifiant et le rapport E/C avant de mesurer l'étalement par l'appareil de table à secousses.

D'après les résultats d'ouvrabilité, on sélectionne les mélanges de mortiers qui donnent un comportement plastique (étalement de 80%) pour réaliser les essais sur les paramètres rhéologiques et les résistances mécaniques (compression et traction).

Pour déterminer les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et la viscosité plastique) des mélanges du mortier choisis, on utilise un rhéomètre rotatif Heidolph- RZR 2102 Control Z, piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur.

Afin d'étudier l'effet du sable de concassage sur les résistances mécaniques, des éprouvettes prismatiques 40x40x160mm ont été confectionnées. Ces éprouvettes sont conservées dans leurs moules pendant 24 heures au laboratoire à température ambiante. A un jour d'âge, elles sont démoulées et placées dans un bassin rempli d'eau. On choisit cinq échéances d'écrasement à la compression à savoir 1, 3, 7, 28 et 90 jours.

3.3. Matériaux et procédés de fabrication

3.3.1. Ciment

Un ciment Portland composé (II/A 42.5) produit par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) contenant 10% de calcaire a été employé dans cette étude. Ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique et minéralogiques du ciment.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	PAF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	22.6	4.2	3.55	62.17	2.19	0.63	0.42	1.84	41.8	33.3	5.1	10.7

3.3.2. Sable

Deux types de sable ont été utilisés dans cette étude ; un sable naturel provenant d'Oued Ras et un sable de concassage de nature minéralogique silico-calcaire provenant de la carrière d'Oued Fodda (Chlef) et dont les principales caractéristiques sont regroupées dans le tableau 3.2. L'analyse granulométrique des deux sables est présentée dans la figure 3.1. La texture de la surface et la forme des particules de ces sables sont illustrées sur la figure 3.2.

Pour notre étude le sable de concassage utilisé contient 15% de fines, ce pourcentage de fines est acceptable pour être utilisé régulièrement dans les mélanges des bétons aux mortiers par plusieurs pays dans le monde. Par exemple, les normes britanniques (BS 822) permettent jusqu'à 16% du pourcentage des fines dans le sable alors

que la norme française NF P 18 541 et la norme australienne exige des limites à moins de 18 % et 25 %, respectivement et jusqu'à 20 % pour la norme indienne.

Tableau 3.2: Caractéristiques des deux sables utilisés.

Caractéristiques	Densité apparente (g/cm ³)	Module de finesse	Densité (g/cm ³)	Coefficient d'uniformité	Equivalent de sable (%)
Sable naturel	1.5	2.27	2.56	2.17	76.61
Sable de concassage	1.47	2.97	2.62	3.96	79.64

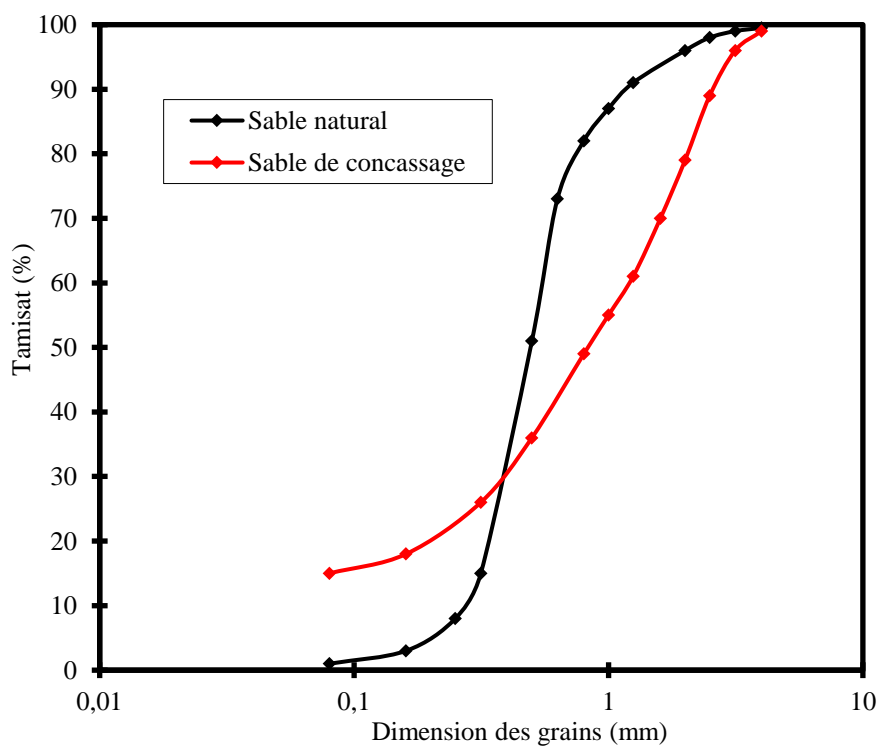


Figure 3.1: Courbes granulométriques des sables.

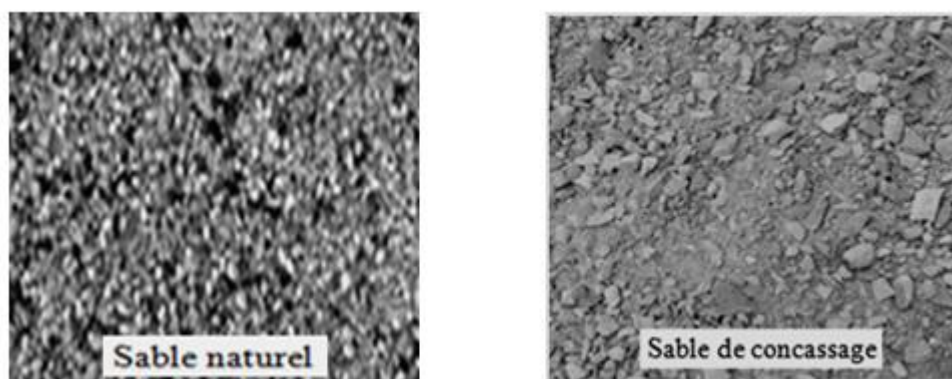


Figure 3.2: Texture de la surface du sable naturel et concassé.

3.3.3. Adjuvant

Le superplastifiant utilisé pour contrôler l'ouvrabilité du mortier dans cette étude, est fourni par l'entreprise GRANITEX et commercialisé sous le nom : *Médaplast (40)* à base de naphthalène sulfonate noté SP. Le tableau 3.3 présente quelques caractéristiques de ce produit.

Tableau 3.3: Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant.

Caractéristique	Teneur en extrait sec	forme	couleur	Ph	Densité
<i>Médaplast 40</i>	40	Liquide	Opaque	7 à 8	1.16

3.3.4. Eau de Gâchage

Pour la confection des mortiers, on a utilisé de l'eau potable ayant une température comprise entre 15 et 16 °C, pour obtenir la température de la pâte après malaxage constante autour de 20°C. De plus, elle renferme toutes les prescriptions de la norme P18-303 [137].

3.4. Formulation et Confection des éprouvettes

3.4.1. Formulation des mortiers

Dans la première phase expérimentale, on a confectionné des éprouvettes de mortier avec différents mélanges. Le sable naturel a été remplacé partiellement par 20, 40, 60, 80 et 100% du sable de concassage. Trois rapports E/C ont été utilisés avec l'introduction de différents dosages de superplastifiant afin de garder une ouvrabilité constante pour tous les mélanges correspondant à 80% d'étalement. Les compositions des mélanges retenus sont représentées sur le tableau 3.4.

Tableau 3. 4 : Proportions des mélanges de mortiers.

	Taux de remplacement (%)	Sable naturel [SN] (g)	Sable de concassage [SC] (g)	Ciment (g)	E/C
M0	0%	1350	0	450	0.4, 0.5, 0.6
M1	20%	1080	270	450	
M2	40%	810	540	450	
M3	60%	540	810	450	
M4	80%	270	1080	450	
M5	100%	0	1350	450	

3.4.2. Préparation des échantillons

Les mortiers sont préparés dans un malaxeur à mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme NFEN196-1[138]. La procédure de malaxage et le mode d'introduction de l'adjuvant utilisé pour fabriquer les mortiers sont illustrés dans le tableau 3.5. Chaque type de mortier a été confectionné en suivant les étapes ci-dessous :

1. Introduire en premier le ciment et le sable dans la cuve du malaxeur et mélanger à sec pendant 1min à vitesse lente.
2. Ajouter les 2/3 de l'eau de gâchage et malaxer pendant 1 min à vitesse lente.
3. Introduire le 1/3 de l'eau de gâchage plus la quantité du superplastifiant progressivement en malaxant pendant 1 minute.
4. Malaxer pendant 1 minute à vitesse rapide.
5. Le mortier est prêt pour tester son ouvrabilité, sa rhéologie et à remplir les moules destinés à la résistance mécanique assisté par un système de vibration.

Tableau 3.5: Procédure de malaxage et mode d'introduction de l'adjuvant.

Opérations	Introduire (Ciment, sable)	Verser (2/3 E)	Verser (1/3E+SP)		Préparation des échantillons
Durée					
Malaxeur	Vitesse lente		Vitesse Lente	Vitesse Rapide	

3.5. Essais effectués

3.5.1. Essai d'ouvrabilité

Après le malaxage des différents mortiers, on a tout d'abord contrôlé la fluidité par l'essai d'étalement réalisé par une table à secousses représentée sur la figure 3.3. Le déroulement de cet essai a été réalisé selon la norme ASTM C230 [139]. L'essai consiste à mettre le mortier préparé dans un moule tronconique et après le démoulage sur la table à secousses, le mortier reçoit 15 coups en 15 secondes et on mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue comme illustrée dans la figure 3.4. L'étalement en % est l'augmentation du diamètre de la galette sur le diamètre initial donné par la formule suivante:

$$E(\%) = 100(D_f - D_i) / D_i$$



Figure 3.3: Essai d'étalement pour mortier.



Figure 3.4: Les démarches de l'essai d'ouvrabilité par la table à secousse.

Les tableaux 3.6, 3.7 et 3.8 récapitulent les formulations des mélanges des mortiers réalisés pour mesurer l'étalement. Ainsi, on varie le dosage en superplastifiant pour chaque mélange du mortier avec différents rapports E/C (0.4, 0.5 et 0.6).

Tableau 3.6: Proportions du mélange des mortiers avec $E/C=0.4$.

Désignation	[SN] (g)	[SC] (g)	ciment (g)	Eau (g)	Pourcentage de SP (%)			
					10	12	14	16
M ₀	1350	0	450	180	10	12	14	16
M ₁	1080	270	450	180	5	6	8	10
M ₂	810	540	450	180	2.5	3	3.5	4
M ₃	540	810	450	180	2	2.5	3	3.3
M ₄	270	1080	450	180	1.5	1.8	2	3
M ₅	0	1350	450	180	1	1.5	2	2.2

Tableau 3.7: Proportions du mélange des mortiers avec $E/C=0.5$.

Désignation	[SN] (g)	[SC] (g)	ciment (g)	Eau (g)	Pourcentage de SP (%)			
					1.8	2.5	3	3.3
M ₀	1350	0	450	225	1.8	2.5	3	3.3
M ₁	1080	270	450	225	1.2	1.8	2.5	2.7
M ₂	810	540	450	225	0.8	1.4	1.8	2
M ₃	540	810	450	225	1	1.5	1.8	2
M ₄	270	1080	450	225	0.5	1	1.2	1.5
M ₅	0	1350	450	225	0.5	1	1.4	1.8

Tableau 3.8: Proportions du mélange des mortiers avec $E/C=0.6$.

Désignation	[SN] (g)	[SC] (g)	ciment (g)	Eau (g)	Pourcentage de SP (%)				
					1.8	1.6	1.4	1.2	1
M ₀	1350	0	450	270	1.8	1.6	1.4	1.2	1
M ₁	1080	270	450	270	1.2	1	0.8	0.7	/
M ₂	810	540	450	270	0.8	0.7	0.6	0.5	/
M ₃	540	810	450	270	0.8	0.6	0.5	0.3	/
M ₄	270	1080	450	270	0.4	0.3	0.15	0	/
M ₅	0	1350	450	270	0.4	0.2	0.1	0	/

3.5.2. Essai de la rhéologie

3.5.2.1. Rhéomètre utilisé

Pour déterminer expérimentalement le comportement rhéologique des mortiers tel que la viscosité et le seuil de cisaillement, on utilise un rhéomètre rotatif représenté sur la figure 3.5. Ce rhéomètre est composé par trois parties principales : un Agitateur de marque Heidolph- RZR 210 2 Control Z avec deux vitesses de rotation. Il est caractérisé par une vitesse de rotation de 4 à 540 tr/min (± 1 tr/min) et un couple maximal de 740 N.cm ($\pm 0,1$ N.cm). Un croisillon de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur sert à cisailier le mortier et d'un récipient cylindrique de 10 cm de diamètre et 13 cm de hauteur comme c'est illustré sur la figure 3.6.

Le rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z, peut fonctionner en imposant des taux de cisaillement appliqués sur le mortier d'où on obtient les contraintes de cisaillement. À partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de chaque mortier. Ce rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Le schéma de la figure 3.7 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur.

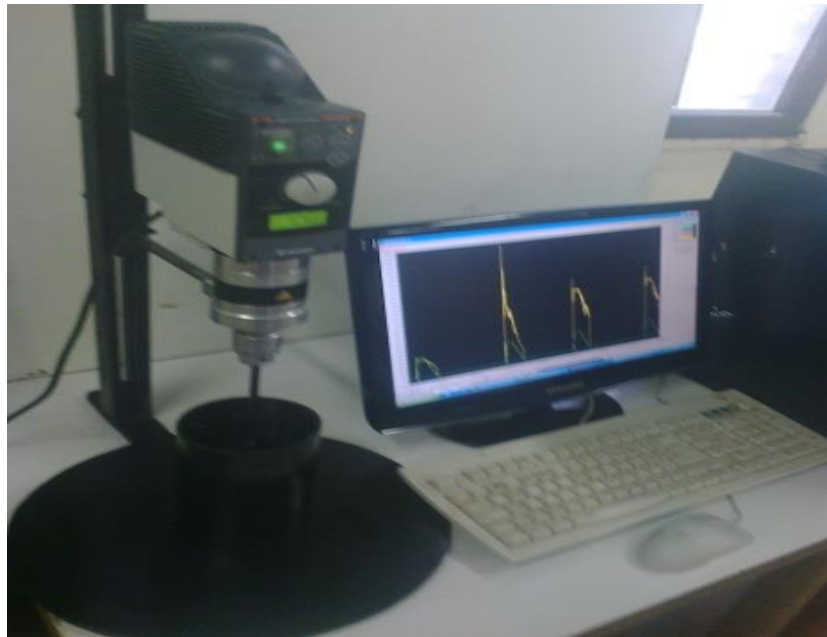


Figure 3.5: Rhéomètre à mortier



Figure 3.6: Différents composants du rhéomètre.

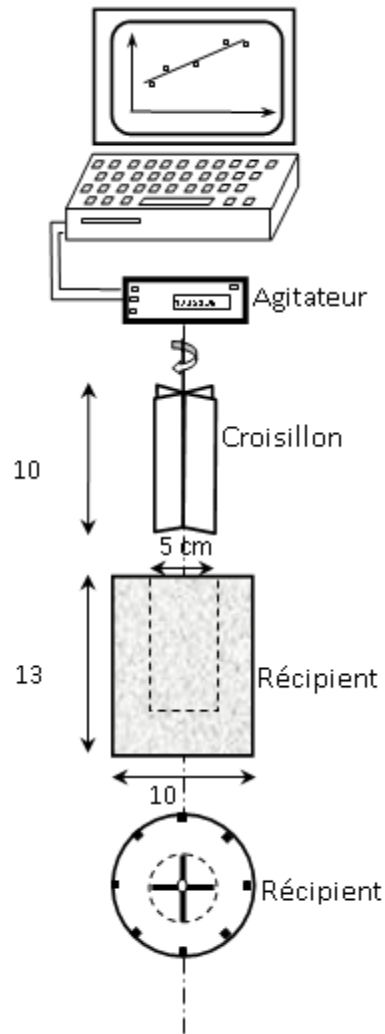


Figure 3.7: Schéma descriptif du rhéomètre à mortier.

Pour les mortiers étudiés dans cette étude, on a sélectionné le dosage convenable en superplastifiant pour chaque taux du sable de concassage avec les trois rapports E/C pour atteindre un comportement plastique correspondant à un étalement de 80% dont les dosages sont récapitulés sur le tableau 3.9.

Tableau 3.9: Proportions du mélange des mortiers pour un étalement de 80%.
(*) Dosage trop élevés

Les mélanges	Super plastifiant(%) pour étalement de 80%		
	E/C =0.6	E/C =0.5	E/C =0.4
M0 (0%)	1.3	2.5	16 (*)
M1 (20%)	0.75	2.2	7.9 (*)
M2 (40%)	0.55	1.6	3.5 (*)
M3 (60%)	0.45	1.5	2.8
M4 (80%)	0.08	1	1.9
M5 (100%)	0	0.9	1.6

3.5.2.2. Démarche d'essai

Pour mesurer les paramètres rhéologiques, le mortier est introduit dans le récipient en deux couches et chaque couche reçoit quelques coups à l'aide d'une tige. Ensuite, le croisillon est descendu au centre et immergé au milieu du mortier. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier et le récipient doit être fixé pour éviter tout mouvement. A l'aide du logiciel et l'essai rhéométrique, on démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié.

3.5.2.3. Profil de vitesse imposée

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [140]. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). La figure 3.8 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

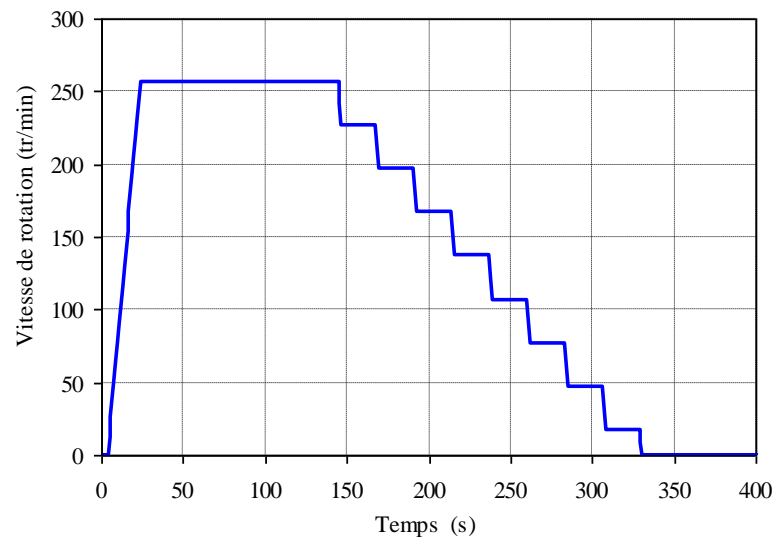


Figure 3.8: Profil de vitesse utilisé [140].

3.5.2.4. Déroulement de l'essai

Afin d'étudier le comportement rhéologiques des différents mortiers, on a suivi les étapes suivantes:

- 1^{ère} étape : avant la réalisation des essais, il faut faire chauffer le rhéomètre en le faisant fonctionner suffisamment à la vitesse maximale de 400 tours/min.
- 2^{ème} étape : mesurer ensuite les couples à vide (M_{vide}) correspondant aux vitesses imposées selon le profil présenté sur la figure 3.8.
- 3^{ème} étape : remplir le mortier jusqu'à l'arase du récipient et piquer 15 fois avec une tige à piquage du mortier; mettre en place et centrer le croisillon de sorte que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arase du récipient; mesurer les couples totaux correspondants aux vitesses imposées (M_{total}).
- 4^{ème} étape : exploiter les mesures des couples (M) en fonction de vitesse imposée. Les couples M sont obtenus en faisant la différence entre M_{total} et M_{vide} .

3.5.2.5. Exploitation des mesures rhéologiques

Pour mieux distinguer le fonctionnement du rhéomètre et la déduction des paramètres rhéologiques des différents mortiers, on présentera une application sur un mortier contenant 60% du SC et 40% du SN avec 0.45% de superplastifiant et un rapport E/C de 0.6. Le tableau 3.10 récapitule les étapes de calcul suivies en se basant sur les démarches présentées par de Lanos et Estélé [67].

a) Colonne 1 :

Cette colonne représente le profil de vitesse imposé pour le rhéomètre. Ce profil a été choisi sur la base de recherches précédentes [140], dans lesquelles ce dernier présente plus de stabilité des résultats.

b) Colonne 2 :

Les vitesses du profil de vitesse seront reconverties en rad/s et récapitulées dans la colonne 2.

c) Colonne 3 :

Les moments M_{vide} enregistrés par le rhéomètre sont représentés sur la colonne 3. Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.

d) Colonne 4 :

Les moments totaux M_{plein} enregistrés par le rhéomètre sont représentés sur la colonne 4. Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli de mortier.

e) Colonne 5 :

Dans cette colonne sont calculés les moments totaux. Ils s'obtiennent par la différence entre les moments à l'état plein et les moments à l'état vide pour chaque palier de vitesse.

$$M_{\text{final}} = M_{\text{plein}} - M_{\text{vide}} \quad (3.1)$$

f) Colonne 6 :

La variation du moment total, en fonction de la vitesse de rotation, est ajustée linéairement et des nouvelles valeurs du moment sont déduites. La figure 3.9 illustre la corrélation linéaire obtenue à partir de laquelle les moments linéarités M_l seront calculés et regroupés dans la colonne 6.

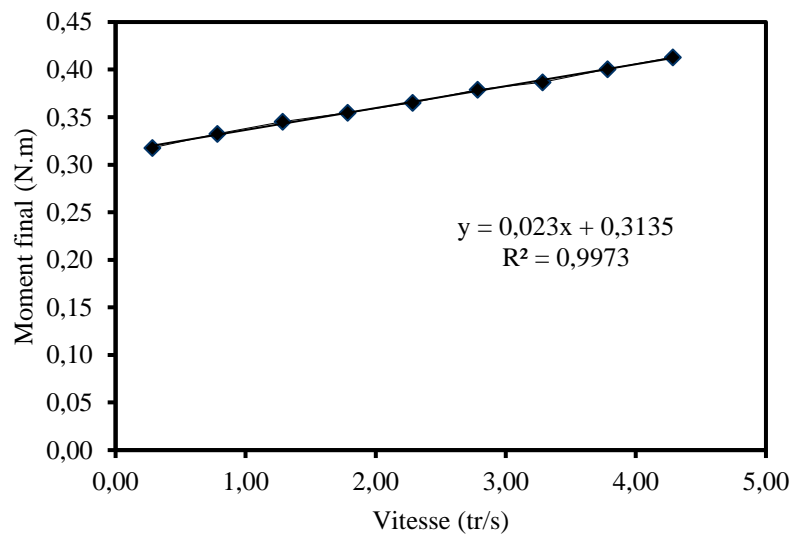


Figure 3.9: Linéarisation des moments finaux en fonction de la vitesse de rotation.

g) Colonne 7:

La relation contrainte-vitesse de cisaillement dans une géométrie couette est établie en considérant localement le fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham. Pour un tel fluide, l'expression de la vitesse de cisaillement dépend du régime d'écoulement dans l'entrefer. Ainsi, la vitesse de cisaillement s'exprime par l'équation 3.2 lorsque le mortier est partiellement cisailé et dont les résultats trouvés sont présentés sur la colonne 7.

$$\dot{\gamma}_1 = 2M \frac{\partial \Omega}{\partial M} \quad (3.2)$$

h) Colonne 8 :

Lorsque le mortier est totalement cisailé, l'expression de la vitesse de cisaillement est donnée par l'équation 3.3. Les valeurs trouvées pour chaque vitesse de rotation sont récapitulées dans la colonne 8.

$$\dot{\gamma}_2 = 2 \frac{M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (3.3)$$

Où R_1 représente le rayon du croisillon et R_2 est le rayon du récipient.

i) Colonne 9 :

Dans la colonne 9, on combine entre les deux expressions des vitesses de cisaillement qui gouvernent l'écoulement dans le récipient. La valeur convenable de la vitesse de cisaillement est celle entraînant plus de dissipation d'énergie. Donc, la vitesse de cisaillement peut être donnée par l'équation 3.4 où les valeurs trouvées sont récapitulées dans la colonne 9.

$$\dot{\gamma} = \max\left(\dot{\gamma}_1 ; \dot{\gamma}_2\right) \quad (3.4)$$

j) Colonne 10 :

Dans la colonne 10, on calcule la contrainte de cisaillement dans le mortier à partir du moment appliqué et les dimensions du croisillon. Pour un calcul simplifié on trouve :

$$\tau = \frac{M_l}{2 \pi R^2 h} \quad (3.5)$$

j) Colonne 11 :

Sur un palier de vitesse de cisaillement, on peut évaluer le cisaillement moyen par l'expression 3.6. La colonne 11 regroupe les valeurs trouvées pour chaque vitesse de cisaillement.

$$\tau_{moy} = \frac{1}{2}(\tau_i + \tau_{i-1}) \quad (3.6)$$

Tableau 3.10: Calcul du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour un mortier contenant 60% SC et 40% SN.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vitesse de référence Ω (tr/mn)	Ω (rad/s)	M_{vide} (N.m)	M_{plein} (N.m)	M_{total} (N.m)	$M_{linéarisé}$ (N.m)	$\dot{\gamma}_1$ (1/s)	$\dot{\gamma}_2$ (1/s)	$\dot{\gamma}_{max}$ (1/s)	τ (Pa)	τ_{moy} (Pa)
257	26.91	0,196	0,609	0,413	0,412				1051,9	
227	23.77	0,186	0,586	0,400	0,401	218,54	168,04	218,5	1019,7	1035,0
197	20.63	0,176	0,563	0,387	0,389	212,25	159,66	212,3	984,6	1005,6
167	17.49	0,166	0,545	0,379	0,378	205,97	151,28	206,0	965,1	976,3
137	14.35	0,154	0,519	0,365	0,366	199,69	142,90	199,7	929,9	947,9
107	11.21	0,143	0,498	0,355	0,355	193,40	134,53	193,4	903,3	917,6
77	8.06	0,130	0,476	0,345	0,343	187,12	126,15	187,1	879,7	888,3
47	4.92	0,115	0,448	0,333	0,332	180,84	117,77	180,8	847,1	859,0
17	1.78	0,102	0,419	0,318	0,320	174,56	109,39	174,6	809,3	829,6
0	0.00	0,000	0,000	0,000	0,000	00,0	0,00	00,0	00,0	00,0

La courbe de tendance obtenue à partir des points $(\tau_i - \dot{\gamma}_i)$ permet d'estimer la viscosité par la pente de la droite et le seuil de cisaillement du mortier par la contrainte correspondant à une vitesse nulle. La figure 3.10 présente la corrélation linéaire entre la contrainte et la vitesse de cisaillement où le seuil prend la valeur de 14.43 Pa et la viscosité 4.62 Ps.s pour le mortier M₃ pris comme exemple.

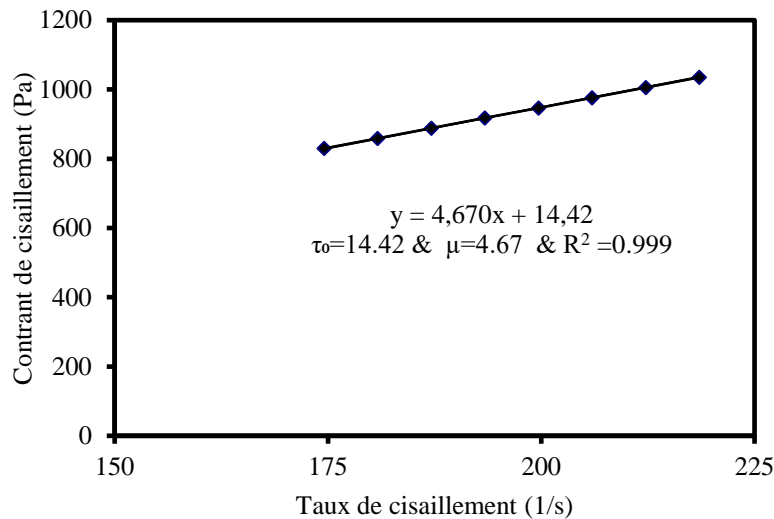


Figure 3.10: Variation de la contrainte de cisaillement et fonction de la vitesse de cisaillement. (M_3 : 60% SC, 40% SN, 0.45% SP, E/C 0.6.).

3.5.2.6. Répétitivité des essais

Afin de confirmer la fiabilité de nos résultats, certains ont été refaits et comparés. Les figures 3.11 et 3.12 illustrent une comparaison des valeurs de la viscosité et du seuil de cisaillement entre le premier et le deuxième essai. Les résultats sont encourageants et confirment la convenance de cet essai et sa fiabilité où les coefficients de corrélations trouvés sont proches de l'unité.

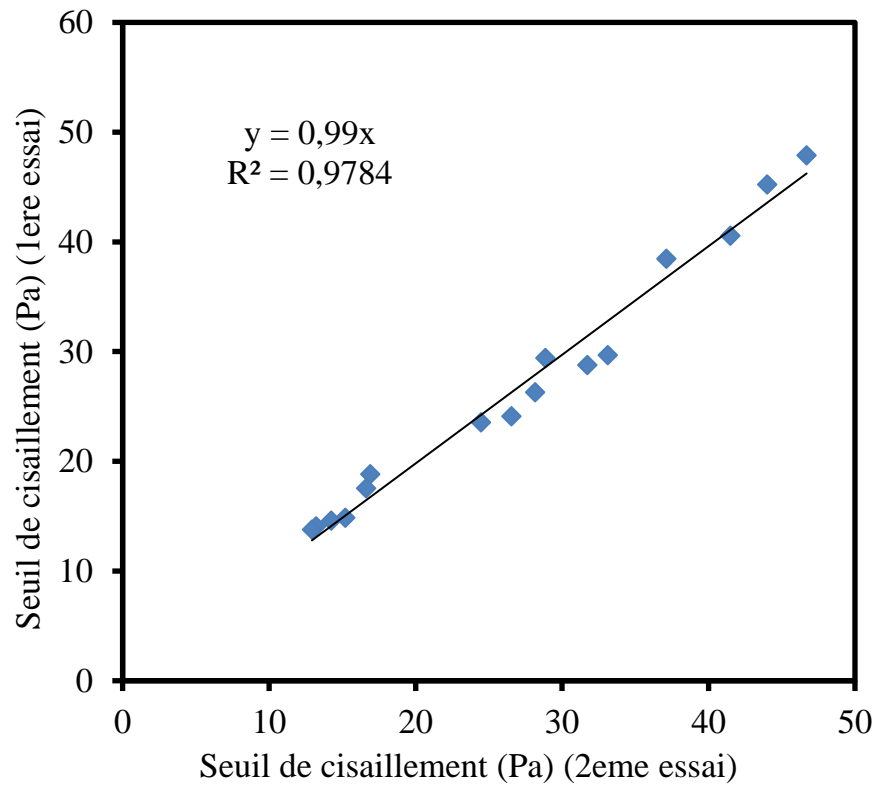


Figure 3.11 : Répétitivité des résultats de seuil de cisaillement d'un mortier

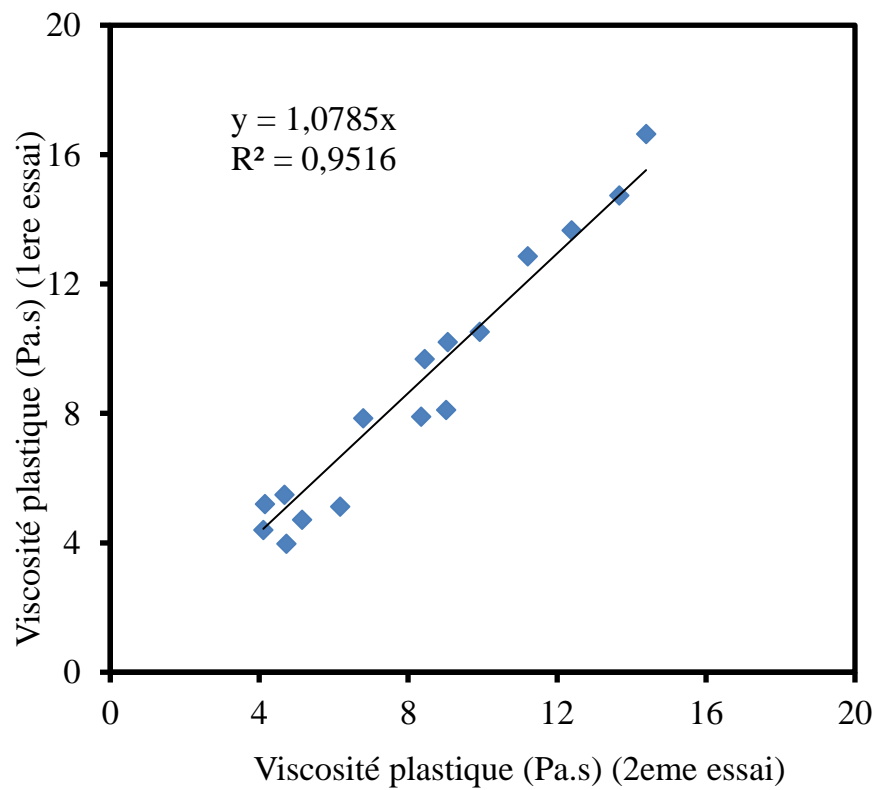


Figure 3.12 : Répétitivité des résultats de la viscosité plastique d'un mortier

3.5.3. Essai de Résistance mécanique

Pour mettre en évidence l'effet du sable de concassage sur la résistance mécanique, des échantillons de mortiers ont été confectionnés suivant la norme EN 196-1 [138]. On a utilisé des moules normalisés à trois compartiments horizontaux pour permettre la préparation de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de 40 mm x40 mm et de 160 mm. Le remplissage des ces moules a été effectué sur une table vibrant à 60 coups pour deux couches (figure 3.13). Les éprouvettes fabriquée sont été couvertes par un film plastique pendant 24 heures jusqu'au démoulage afin d'éviter une dessiccation surfacique initiale. Après le démoulage, elles sont été conservées dans un bassin rempli d'eau maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ jusqu'au jour de l'écrasement. Les essais mécaniques sur mortier sont été réalisés aux échéances de 1, 3, 7, 28 et 90 jours. Chaque valeur de résistance mécanique soit en compression ou en traction représente la moyenne de trois essais où le coefficient de variation est toujours inférieur à 6%.

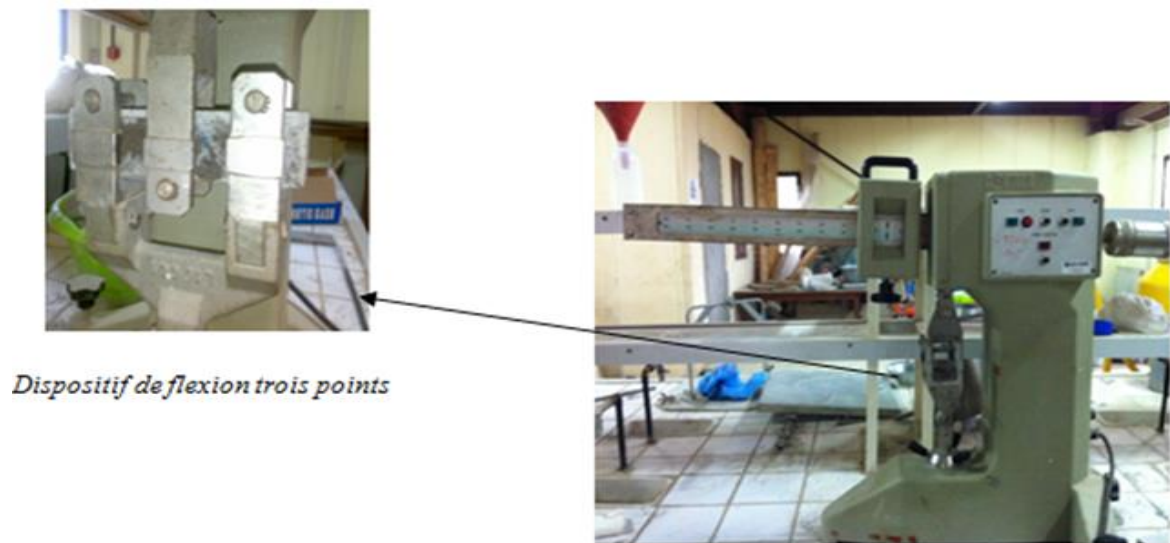


Figure 3.13 : Table vibrante pour mortier.

3.5.3.1. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été effectuée sur les éprouvettes prismatiques de mortier 40x40x160mm pour chaque variable conformément à la norme NFEN196-1 [138]. Cet essai est réalisé avec une presse de flexion trois points de capacité 5 kN représentée sur la figure3.14. L'essai est conduit comme suite:

- Prendre les éprouvettes 40x40x160 préparées à l'avance et les placer entre les appuis de l'appareil de flexion. Les faces latérales (lisses) de l'éprouvette doivent être en contact avec les appuis (figure 3.15).
- Amener l'appui supérieur en contact avec la face supérieure de l'éprouvette et appliquer la charge.
- Relever la valeur de la force de rupture; soit " F ".
- Refaire la même opération pour les autres éprouvettes.



Dispositif de flexion trois points

Figure 3.14: Machine de flexion trois points pour éprouvettes prismatiques de mortiers (40 x 40 x 160 mm).

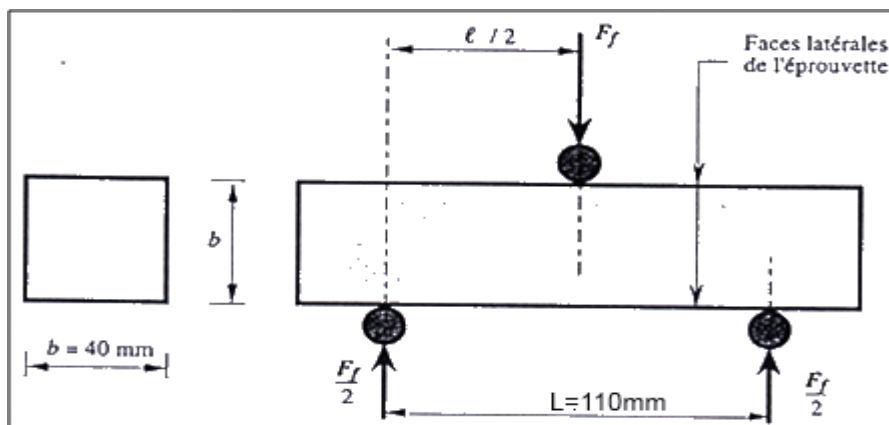


Figure 3.15: Principe de l'essai par flexion

- Appliquer la formule ci-dessous, pour calculer la résistance à la traction du mortier

$$R_t = \frac{3 F L}{2 a^3}$$

Où :

R_t : Résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : Force de rupture exprimée en Newton.

a : dimension de la section ($a=40$ mm).

L : longueur entre les deux appuis ($L=110$ mm)

3.5.3.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été évaluée sur les demi-épreuves de mortier obtenues lors de l'essai de flexion trois points selon la norme NF EN 196-1 [138]. Cet essai est réalisé par une presse de compression représentée sur la figure 3.16. L'essai est conduit comme suite:

- Placer le demi-prisme (obtenu à partir de l'essai de traction par flexion) entre les deux plateaux de la presse. Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être planes et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette (figure 3.18).
- Amener les plateaux en contact avec les faces de l'éprouvette, et appliquer la charge.
- Relever la valeur de la force de rupture; soit " F_r ".
- Refaire les mêmes opérations pour les autres demi-prismes.
- La résistance à la compression du mortier se calcule par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_r}{b^2}$$

Où :

R_c : Résistance à la compression exprimée en MPa.

F_r : Force de rupture exprimée en Newton.

b^2 : Section du prisme donnée par 40×40 mm².



Dispositif d'essai de compression

Figure 3.16: Presse de compression.

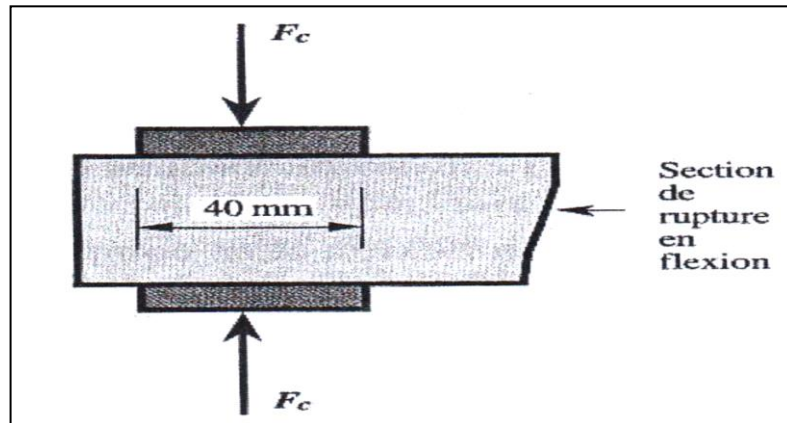


Figure 3.17 : Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme.

Pour les formulations des mortiers menés dans cette partie, on a sélectionné le dosage convenable en superplastifiant pour chaque mélange du mortier avec les trois rapports E/C (0.4, 0.5 et 0.6) pour atteindre un comportement plastique correspondant à un étalement de 80% comme illustré dans les tableaux 3.11, 3.12 et 3.13.

Tableau 3.11: Formulation des différents mélanges des mortiers avec $E/C=0.4$

Les mélanges	Sable naturel (g)	Sable de concassage (g)	Ciment (g)	Eau (g)	Superplastifiant (%)
M0 (0%)	1350	0	450	180	16
M1 (20%)	1080	270	450	180	7.9
M2 (40%)	810	540	450	180	3.5
M3 (60%)	510	810	450	180	2.8
M4 (80%)	270	1080	450	180	1.9
M5 (100%)	0	1350	450	180	1.6

Tableau 3.12: Formulation des différents mélanges des mortiers avec $E/C=0.5$

Les mélanges	Sable naturel (g)	Sable de concassage (g)	Ciment (g)	Eau (g)	Superplastifiant (%)
M0 (0%)	1350	0	450	225	2.5
M1 (20%)	1080	270	450	225	2.2
M2 (40%)	810	540	450	225	1.6
M3 (60%)	510	810	450	225	1.5
M4 (80%)	270	1080	450	225	1
M5 (100%)	0	1350	450	225	0.9

Tableau 3.13: Formulation des différents mélanges des mortiers avec $E/C=0.6$

Les mélanges	Sable naturel (g)	Sable de concassage (g)	Ciment (g)	Eau (g)	Superplastifiant (%)
M0 (0%)	1350	0	450	270	1.3
M1 (20%)	1080	270	450	270	0.75
M2 (40%)	810	540	450	270	0.55
M3 (60%)	510	810	450	270	0.45
M4 (80%)	270	1080	450	270	0.08
M5 (100%)	0	1350	450	270	0

3.6. Conclusion

Ce programme expérimental vise à évaluer l'effet de substitution partielle et totale du sable naturel par le sable de concassage sur la rhéologie et les résistances mécaniques du mortier. Dans ce cadre, une composition du mortier avec différents taux du sable de concassage a été retenue, les rapports E/C employés est de 0.4, 0.5 et 0.6. Les paramètres rhéologiques des différents mortiers sont mesurés par un rhéomètre. Les essais d'écrasement sont effectués sur des éprouvettes de tailles de 4x4x4cm à l'âge de 1, 3, 7, 28 et 90 jours. Les résultats de ces essais seront présentés dans les chapitres 4 et 5 où une discussion, des résultats obtenus, sera donnée afin de comprendre la contribution de chaque taux de la substitution de SN par SC sur le comportement rhéologique et mécanique du mortier et une correction des pertes de performances est envisagée par l'ajout de l'eau de gâchage et le dosage en super-plastifiant.

Chapitre 04

Ouvrabilité et rhéologie des mortiers à base de sable de concassage

4.1. Introduction

Le sable de concassage représente une alternative prometteuse pour substituer le sable naturel dans la construction et préserver l'environnement contre la consommation excessive des sables de rivières. Dans ce chapitre, on présente et on discute les résultats de l'étude expérimentale qui a pour but d'évaluer l'effet de substitution partielle ou totale du sable naturel par le sable de concassage dans le mortier sur l'ouvrabilité, la rhéologie. Des relations mathématiques sont proposées pour exprimer cet effet sur les propriétés rhéologique du mortier. Une analyse sommaire et des tentatives de discussion et d'exploitation de ces résultats sont données.

4.2. Ouvrabilité

4.2.1. Effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité

Les résultats de mesure de l'étalement d'un mortier sans superplastifiant, ayant un rapport E/C de 0.6, en fonction du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage sont représentés sur la figure 4.1. Il est bien visible que l'ouvrabilité du mélange augmente avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage à cause des fillers calcaires qui possèdent un grand pouvoir de dispersion. Le sable de concassage est très bénéfique et fait augmenter l'étalement du mortier de 10% pour chaque 20% du sable substitué. L'analyse des résultats de l'étalement des différents mélanges montre qu'il est possible d'établir une relation entre les valeurs de l'étalement pour les mortiers à base de sable naturel et avec du sable de concassage. La figure 4.1 illustre une relation acceptable qui prédit l'étalement du mortier contenant différents taux de la substitution de SN par SC. Cette relation a un coefficient de corrélation acceptable qui témoigne à la pertinence du choix. Ainsi, il est possible d'atteindre des propriétés d'ouvrabilité d'un mortier en ajoutant une certaine proportion du sable de concassage. Cette relation est écrite comme suit:

$$E = 30 + 45 \sqrt{p} \quad (4.1)$$

Où E représente l'étalement des mortiers en % et p représente le taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage.

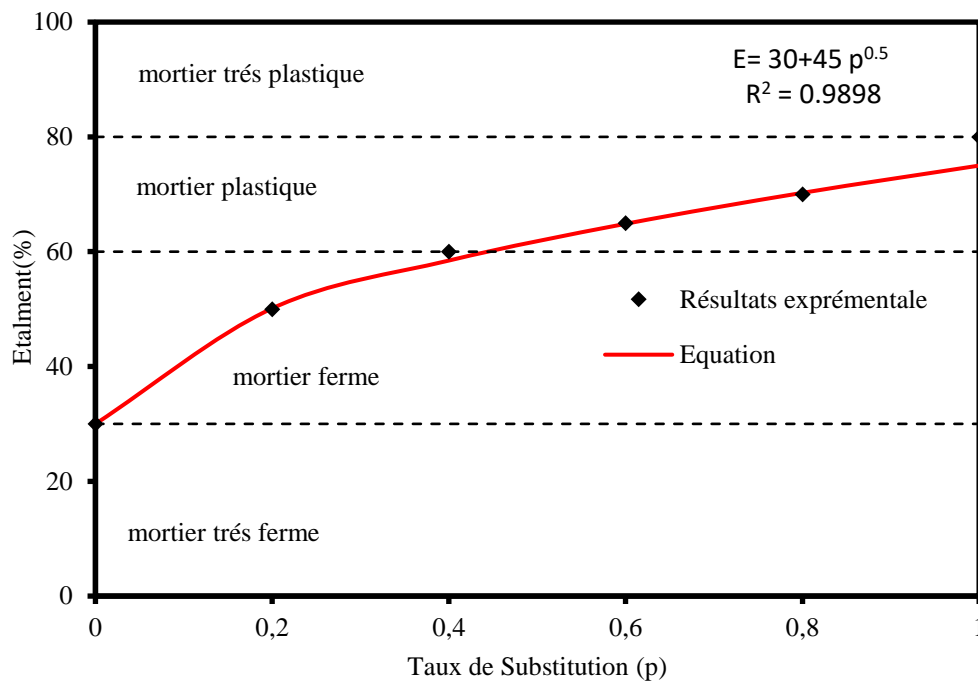


Figure 4.1: Variation d'ouvrabilité du mortier (étalement %) en fonction du taux de substitution de SN par SC ($E/C=0.6$)

4.2.2. Effet du sable de concassage sur le besoin en eau

Pour évaluer le besoin en eau d'un mortier contenant du sable de concassage, on a préparé des mélanges du mortier, sans superplastifiant, avec différents taux de remplacement et en variant le rapport E/C pour atteindre un étalement de 80%. Les résultats illustrés sur la figure 4.2 montrent que la demande en eau diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage. Le mortier à base du sable naturel a besoin de 0.66 de rapport E/C pour atteindre un étalement de 80% tandis que le mortier avec 100% du sable de concassage atteint cette valeur avec un rapport E/C égal 0.6 seulement. Le besoin en eau augmente dans tous les mélanges et plus spécialement pour les mortiers avec un faible taux du sable de concassage. On remarque aussi que chaque fois qu'on substitue le sable naturel par 20% du sable de concassage on gagne 1% du rapport E/C. De même, on trouve un modèle compatible avec une relation linéaire entre les résultats expérimentaux et numériques de l'effet du sable de concassage sur le besoin en eau par un coefficient de corrélation égal à 0,986. Cette relation donne une estimation du rapport E/C pour obtenir un mortier avec un étalement de 80% en fonction du taux de remplacement de SN par SC pour un mortier non adjuvanté, elle s'écrit comme suit:

$$\frac{E}{C} = 0.66 - 0.06p^{1.3} \quad (4.2)$$

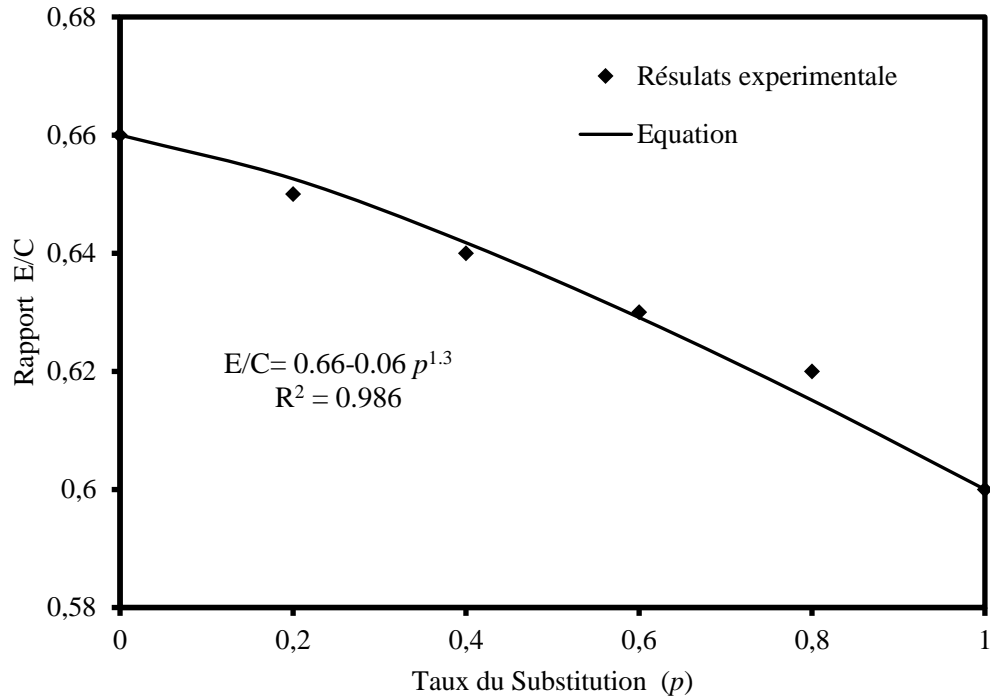


Figure 4.2: Variation du rapport E/C en fonction du taux de substitution de SN par SC pour atteindre un étalement de 80% pour un mortier non adjuvanté.

4.2.3. Effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité avec superplastifiant

Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 récapitulent les résultats de l'étalement obtenus par la table à secousses pour des différents mortiers en fonction de dosage en superplastifiant et le rapport E/C. Selon les figures 4.3, 4.4 et 4.5, on remarque que l'ouvrabilité s'améliore avec la présence de superplastifiant, le rapport E/C et le sable de concassage. Lors de la mise en place du mortier, on a constaté une diminution de la plasticité lorsque le rapport E/C diminue. Le mélange M₅ composé totalement du sable de concassage présente la meilleure ouvrabilité et nécessite le minimum de superplastifiant pour tous les rapports E/C. Pour un rapport E/C de 0.6, le mortier à base de sable naturel a besoin de 1.3% de superplastifiant pour atteindre un étalement de 80% tandis que le mortier avec 100% de sable de concassage atteint cette valeur sans aucun superplastifiant. En diminuant le rapport E/C, le besoin en superplastifiant augmente pour tous les mélanges et plus

spécialement pour les mortiers avec des faibles taux de sable de concassage. Pour un taux de sable inférieur à 40% et pour un rapport E/C de 0.4, le besoin en superplastifiant atteint des dosages supérieurs à 2.5% ce qui crée une ségrégation du mortier et un retard de sa prise. Donc, on peut dire que l'utilisation du sable de concassage dans le mortier présente une meilleure ouvrabilité et permet d'économiser l'utilisation excessive de superplastifiant. De même, elle permet l'utilisation de rapport E/C plus faible avec des dosages de superplastifiant tolérables tout en gardant une ouvrabilité acceptable ce qui est impossible de le réaliser avec le sable naturel uniquement.

Tableau 4.1 : *Etalement de mortier avec différents taux de sable de concassage en fonction de pourcentage de superplastifiant avec E/C=0.4.*

Mélange	Superplastifiant(%)	Diamètre finale (cm)	Etalement(%)
M ₀	10	12	20
	12	14	40
	14	16.5	65
	16	18	80
M ₁	5	11	10
	6	12	20
	8	16.5	65
	10	21	110
M ₂	2.5	13.5	35
	3	14.5	45
	3.5	17	70
	4	20.5	105
M ₃	2	11.5	15
	2.5	14.5	45
	3	18.2	82
	3.3	20.5	105
M ₄	1.5	12	20
	1.8	15.2	52
	2	18.3	83
	3	22	120
M ₅	1	12.5	25
	1.5	17	70
	1.8	18.7	87
	2.2	20	100

Tableau 4.2 : *Etalement de mortier avec différents taux de sable de concassage en fonction de pourcentage de superplastifiant avec E/C=0.5.*

Mélange	Superplastifiant (%)	Diamètre finale (cm)	Etalement (%)
M0	1.8	12	20
	2.5	18	80
	3	20.5	105
	3.3	22	120
M1	1.5	13.5	35
	1.8	15	50
	2.3	18.6	86
	2.7	21.5	115
	3	24.5	145
M2	0.8	13	30
	1.4	16.5	65
	1.8	19	90
	2	20	100
	2.2	21.4	114
M3	1	14.3	43
	1.5	17.2	72
	1.8	20	100
	2	22	120
M4	0.5	14	40
	1	18	80
	1.2	20	100
	1.5	21	110
M5	0.5	13	30
	1	18.6	86
	1.4	21	110
	1.8	22.5	125

Tableau 4.3 : *Etalement de mortier avec différents taux de sable de concassage en fonction de pourcentage de superplastifiant avec E/C=0.6.*

Mélange	Superplastifiant(%)	Diamètre finale (cm)	Etalement(%)
M0	1.8	22	120
	1.5	19	90
	1.3	18	80
	1.2	17	70
	1	15	50
M1	1.1	21	110
	1	20	100
	0.8	18.5	85
	0.65	16.5	65
M2	0.8	20.5	105
	0.7	19.3	93
	0.6	18.5	85
	0.45	16.5	65
M3	0.8	21.5	115
	0.6	20.5	105
	0.5	18.6	86
	0.3	16	60
M4	0.4	20.5	105
	0.3	20	100
	0.15	19	90
	0	16	60
M5	0.4	21.5	115
	0.2	20	100
	0.1	18.7	87
	0	18	80

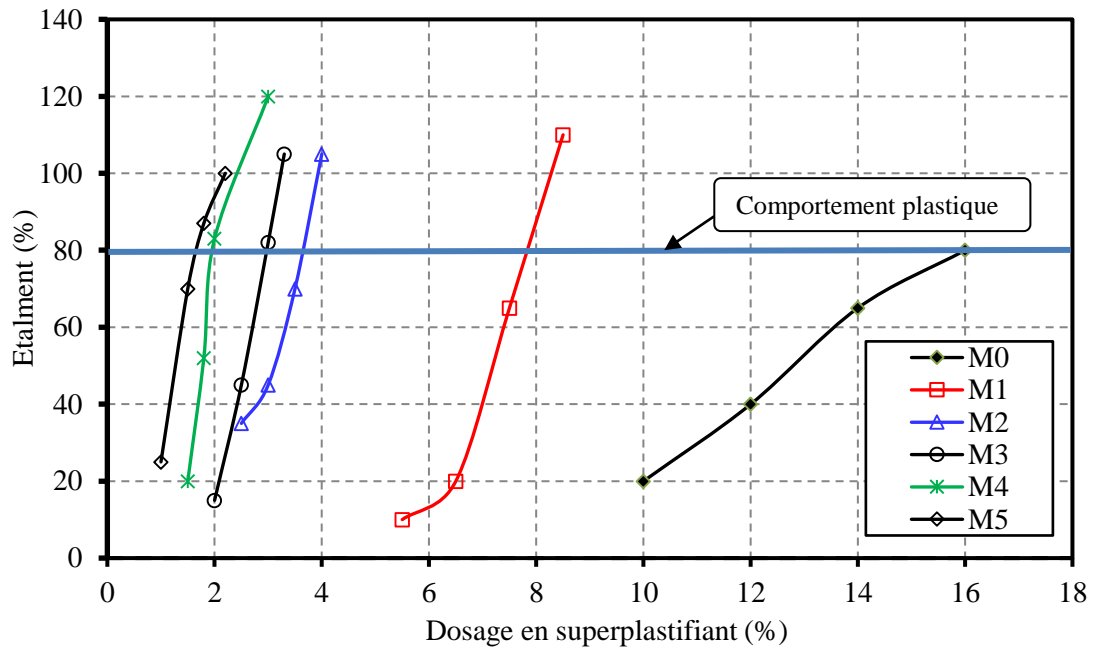


Figure 4.3: Etatement des mortiers en fonction du dosage de superplastifiant avec un rapport E/C de 0,4

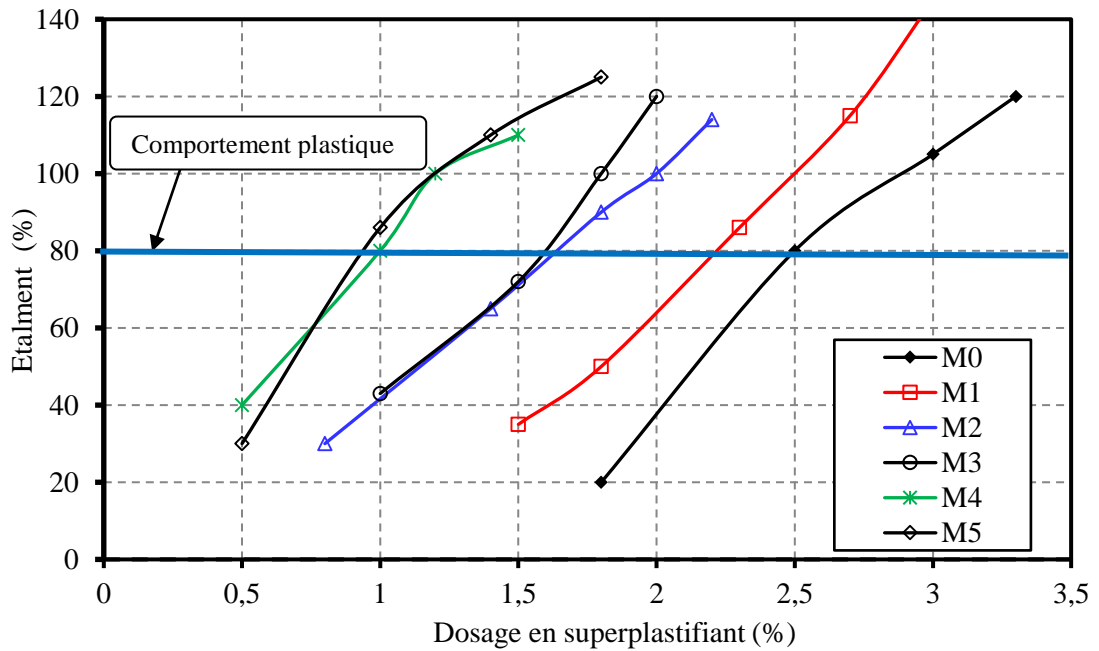


Figure 4.4: Etatement des mortiers en fonction du dosage de superplastifiant avec un rapport E/C de 0,5

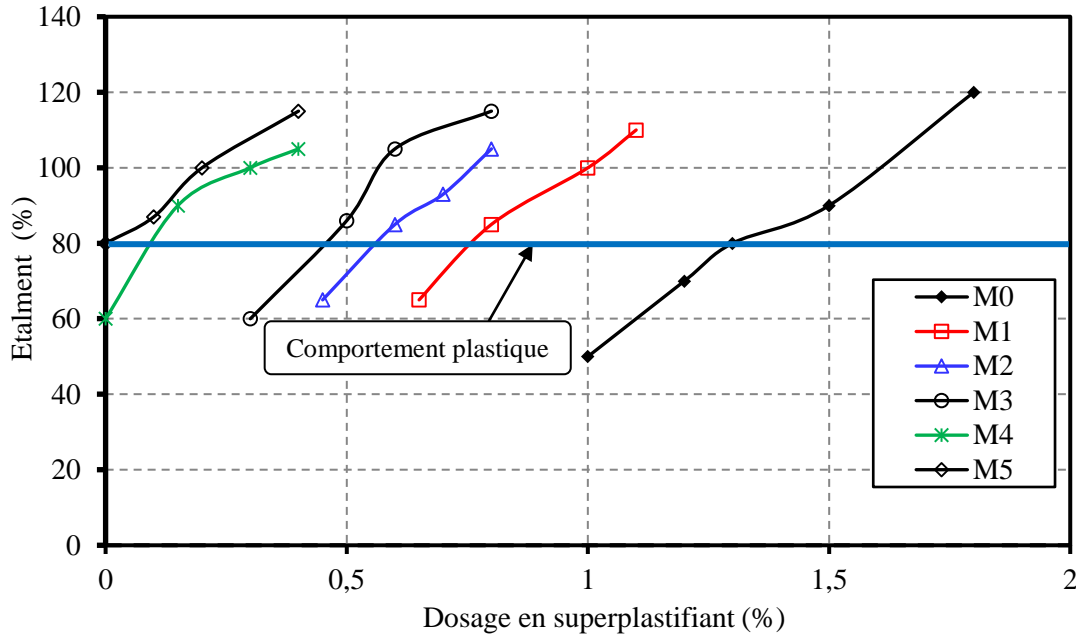


Figure 4.5: Étalement des mortiers en fonction du dosage de superplastifiant avec un rapport E/C de 0,6

4.2.4. Effets du sable de concassage sur le besoin en superplastifiant

Pour bien étudier le besoin en superplastifiant sur l'ouvrabilité du mortier, les mélanges des mortiers avec de comportement plastique correspondant à un étalement de 80% sont sélectionnés pour chaque rapport E/C. La figure 4.6 illustre la variation du dosage en superplastifiant pour divers mortiers correspondant à un comportement plastique. Pour un rapport E/C égal à 0,6, on atteint 80% d'étalement avec 1,3% de superplastifiant pour le mortier M₀, et 0,75%, 0,55%, 0,45%, 0,08% et 0% respectivement pour le mortier M₁, M₂, M₃, M₄ et M₅. Le mortier M₀ à besoin de 2.5% de superplastifiant pour un rapport E/C de 0.5. Par contre pour le rapport E/C de 0.4, la demande en superplastifiant dépasse la limite recommandée et le mortier perd ses principales qualités à l'état frais et durci.

En plus, pour un rapport E/C de 0.5 et 0.6 les dosages en superplastifiant pour tous les mélanges ne dépassent pas 2.5%, ce qui représente un domaine pratique de la construction par contre pour le rapport E/C de 0.4 les mortiers contenant moins de 40% du sable de concassage nécessite un dosage plus de 2.5% de superplastifiant (domaine non pratique) pour atteindre la même maniabilité. Ce dosage induit la ségrégation, retarde le temps de prise et réduit la résistance mécanique initiale. Cependant, le dosage en superplastifiant diminue lorsque le remplacement de SN par SC augmente. On constate un

gain de 0,25, 0,33 et 0,66% de superplastifiant pour chaque 20% des SC utilisé pour le mortier avec des rapports E/C respectivement de 0,6, 0,5 et 0,4. Donc, on peut conclure que l'utilisation du sable de concassage dans le mortier nécessite moins de superplastifiant que le sable naturel et rend quelques mortiers à faibles rapport E/C plus pratique. Les fillers présents dans le sable de concassage jouent un rôle positif dans la dispersion des grains et compensent la réduction du dosage en superplastifiant. En plus, la taille de fines de ces particules contribue à combler les vides entre grains de ciments et à libérer l'eau emprisonnée dans les interstices ce qui augmente l'épaisseur du film d'eau et améliore l'ouvrabilité. La variation de la demande en superplastifiant pour différents mortiers pour atteindre un comportement plastique correspondant à un étalement de 80% est donnée par une relation très simple pour chaque rapport E/C. Le coefficient de corrélation est proche de l'unité et égal à 0,949. Ainsi, la demande de superplastifiant (Sp) de mortier est donnée par l'équation suivante:

$$Sp = \frac{0.18 - 0.14p^{0.66}}{\left(\frac{E}{C}\right)^{3.9}} \tag{4.3}$$

Où p représente le taux de remplacement de SN par SC et E/C le rapport eau sur ciment.

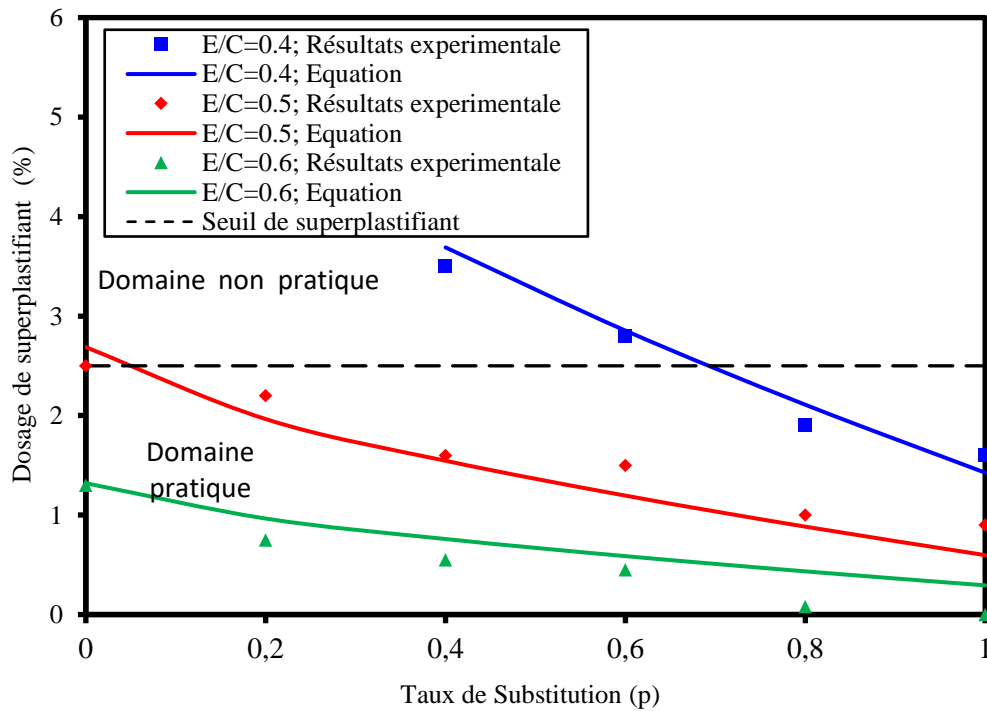


Figure 4.6: Variation du dosage en superplastifiant en fonction du taux du sable de concassage et du rapport E/C pour une ouvrabilité fixe (étalement de 80%).

4.3. Rhéologie des mortiers

4.3.1. Effet du sable de concassage sur les paramètres rhéologiques

Pour les mortiers étudiés, on a sélectionné les dosages convenables en superplastifiant en fonction du taux de sable de concassage et du rapport E/C pour atteindre un comportement plastique correspondant à un étalement de 80% comme présenté au tableau 3.9. Les mortiers sont introduits dans le rhéomètre et les paramètres rhéologiques de chaque mortier sont mesurés. A partir des résultats représentés sur le tableau 4.4 et qui sont également reproduits sur les figures .47 et .48, on conclut que les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique diminuent chaque fois qu'on augmente le rapport E/C ou le taux du sable de concassage. Les valeurs du seuil de cisaillement diminuent chaque fois qu'on substitue le sable naturel par 20% du sable de concassage. Cette diminution est de l'ordre de 7%, 5% et 5.6% respectivement pour des rapports E/C respectivement égaux à 0,4, 0,5 et 0,6. De ceci, on peut remarquer que l'augmentation du taux de substitution de 0% à 100% réduit le seuil de cisaillement de 25%, 23% et 20% respectivement pour des rapports E/C égaux à 0.4, 0.5 et 0.6.

Sur la figure 4.8, on observe que la viscosité plastique diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage pour tous les rapports E/C. Les valeurs de viscosité plastique diminuent chaque fois qu'on substitue le sable naturel par 20% du sable de concassage dans le mortier. Cette diminution est de l'ordre de 7%, 6% et 5.4% respectivement pour des rapports E/C égaux à 0,4, 0,5 et 0,6. En outre, une augmentation du taux de substitution de 0% à 100% réduit la viscosité plastique de 22%, 28% et 23% respectivement pour des rapports E/C égaux 0.4, 0.5 et 0.6.

Tableau 4.4: Paramètres rhéologiques des mortiers en fonction du taux de sable de concassage et du rapport E/C.

Taux de substitution (%)	E/C=0.4		E/C=0.5		E/C=0.6	
	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité (Pa.s)
0	/	/	31.41	10.22	17.87	5.64
20	/	/	30.25	9.63	17.09	5.08
40	47.3	15.51	29.14	9.06	15.4	4.93
60	44.62	14.2	27.25	8.56	14.42	4.67
80	41.04	13.02	25.43	8.12	13.65	4.35
100	37.8	12.03	24.01	7.32	13.36	4.25

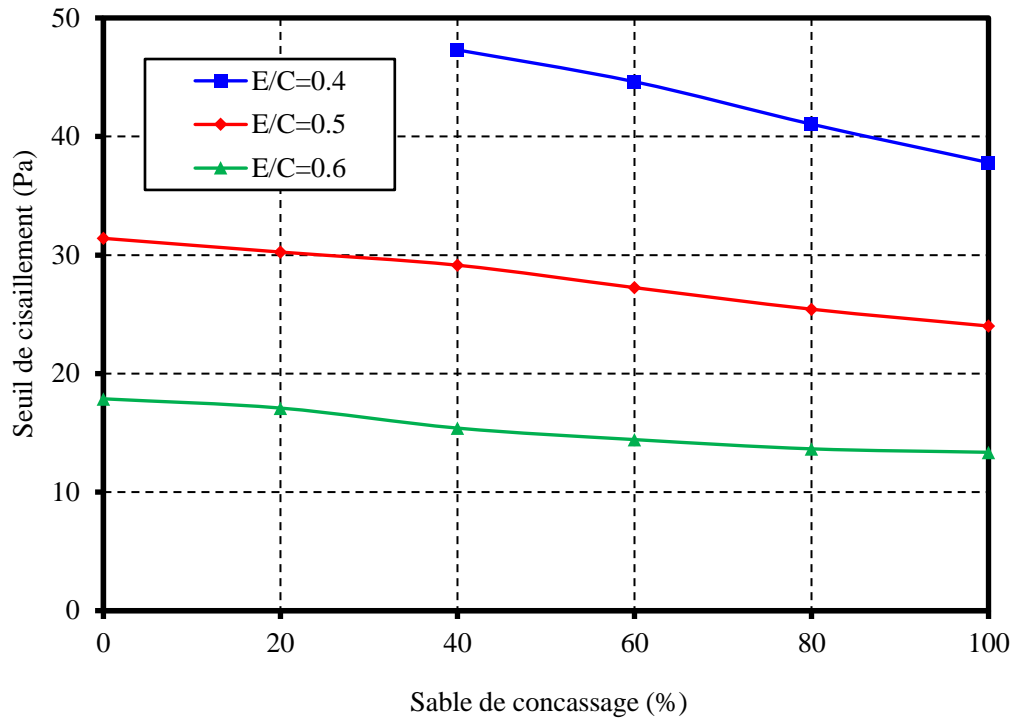


Figure 4.7: Variation du seuil de cisaillement des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour divers rapports E/C.

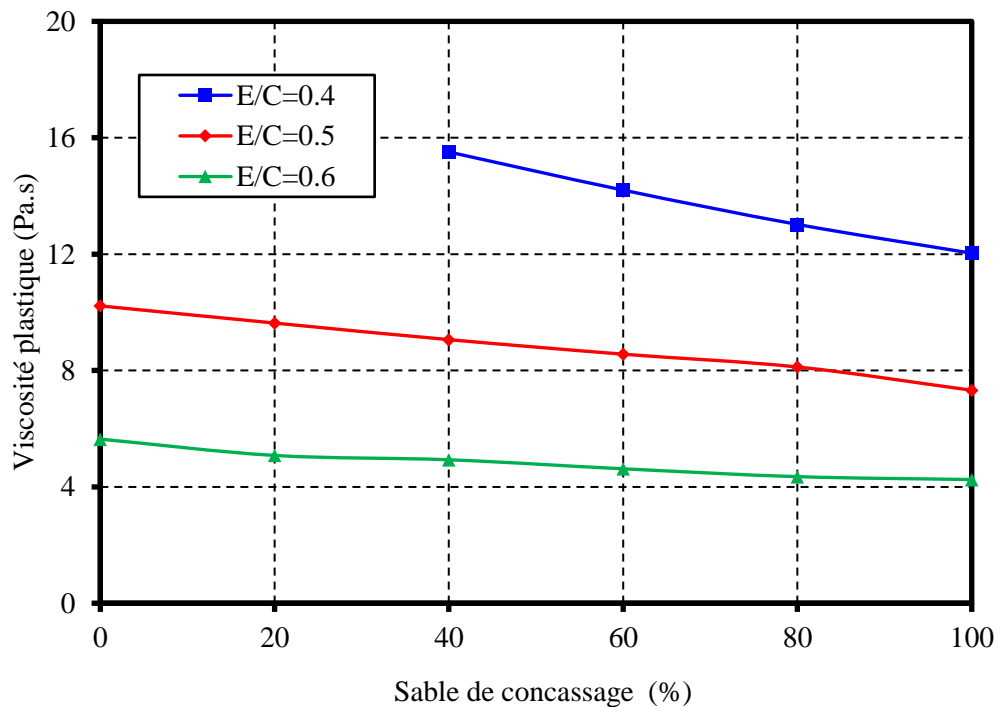


Figure 4.8: Variation de la Viscosité plastique des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour divers rapports E/C.

D'après les résultats obtenus, il a été démontré l'effet important du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage, le dosage en superplastifiant et le rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du mortier. De ceci, il devient plus intéressant de trouver une relation qui relie chaque paramètre rhéologique avec la composition du mortier. Sur la base de multiples corrélations, deux relations sont trouvées qui expriment la variation des paramètres rhéologiques selon la composition du mortier et qui sont exprimées par les expressions suivantes:

Seuil de cisaillement :

$$\tau_0 = (4.47 - 1.62p - 0.23S_p) \left(\frac{E}{C}\right)^{-3} \quad (4.4)$$

Viscosité plastique :

$$\mu = (1.41 - 0.53p - 0.06S_p) \left(\frac{E}{C}\right)^{-3} \quad (4.5)$$

Où τ_0 et μ représente le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du mortier, p est le taux de substitution de SN par SC, E/C est le rapport eau sur ciment et S_p représente le dosage en superplastifiant. Les figures 4.9 et 4.10 montrent une comparaison entre les valeurs expérimentales des paramètres rhéologiques et celles trouvées respectivement par l'équation 4.4 et 4.5. La relation linéaire est convaincante et les coefficients de corrélation sont très proches de l'unité. Ils prennent des valeurs de 0,982 et 0,987 respectivement pour le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

L'analyse des modèles trouvés montrent clairement l'effet bénéfique de superplastifiant, le sable de concassage et le rapport E/C sur la variation des paramètres rhéologiques du mortier. Dans les deux expressions, il apparaît que la variation de rapport E/C conserve un effet identique sur les deux paramètres pendant que le taux du sable de concassage et le dosage en superplastifiant engendrent une diminution linéaire. En plus, le superplastifiant affecte beaucoup la valeur de seuil de cisaillement que la viscosité plastique. Cela peut rendre l'utilisation du sable de concassage très prometteuse lors de la réalisation d'un béton auto-plaçant comme c'est rapporté par plusieurs chercheurs [122, 123, 72 et 87].

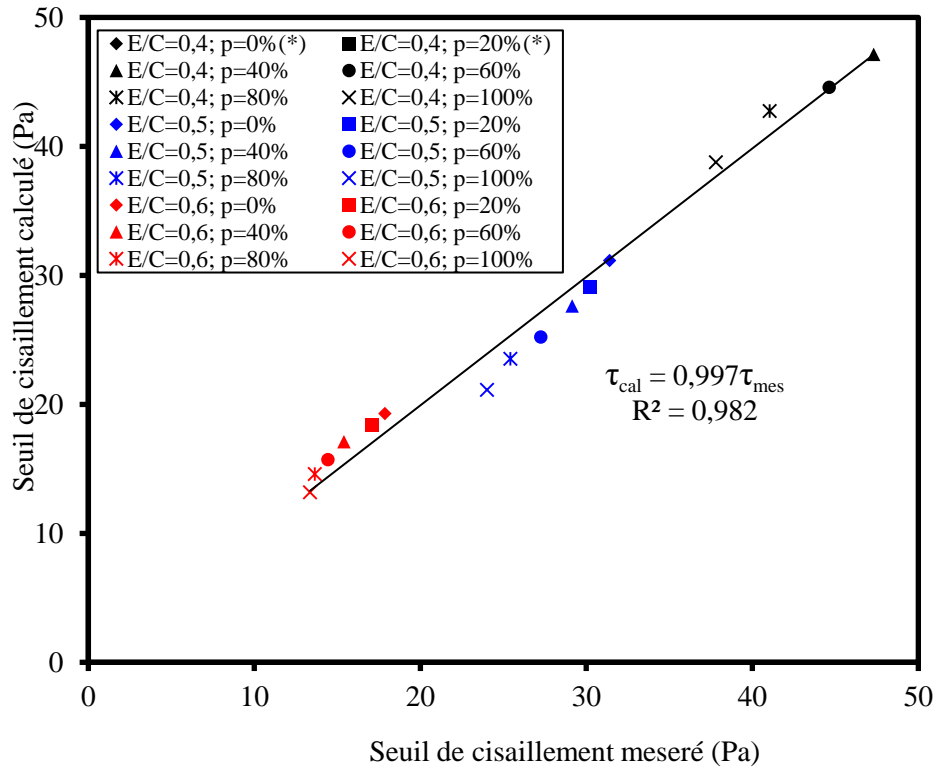


Figure 4.9 : Relation entre les valeurs calculées et mesurées du seuil de cisaillement pour divers mortiers testés. (*) Essai ne peut être effectué.

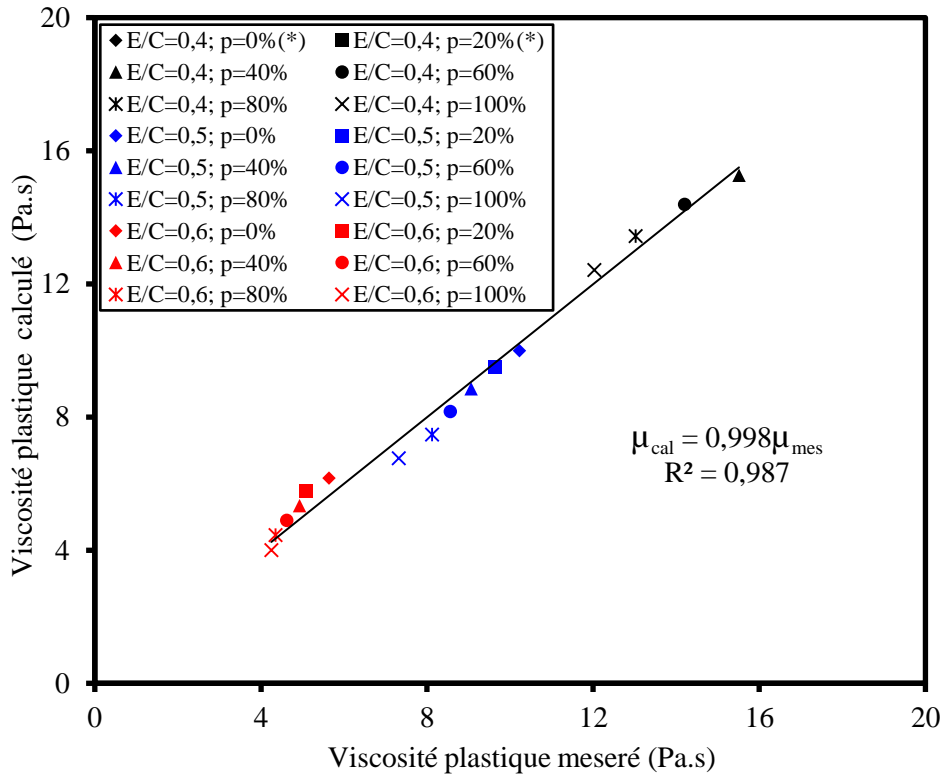


Figure 4.10 : Relation entre les valeurs calculées et mesurées de la viscosité plastique pour divers mortiers testés. (*) Essai ne peut être effectué.

4.3.2. Effet de dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques des mortiers

Les superplastifiants jouent un rôle fondamental dans l'amélioration des propriétés rhéologiques des mortiers et des bétons. Pour mettre en évidence l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques, on a confectionné des mélanges du mortier avec 100% du sable de concassage et des mélanges avec 100% du sable naturel, en faisant varier le dosage en superplastifiant, en gardant le même rapport E/C qui est égale 0.6. Les résultats de cette campagne d'essais sont illustrés sur les figures 4.11, 4.12. On peut montrer que les valeurs de seuil de cisaillement et de la viscosité plastique diminuent chaque fois qu'on augmente le dosage en superplastifiant pour les deux types des mélanges du mortier soit avec sable naturel ou de concassage. Cependant, les valeurs de seuil de cisaillement du mortier à base du sable de concassage sont plus basses que celles du mortier du sable naturel avec une diminution environ 4 Pa. Même résultats trouvées pour les valeurs de la viscosité plastique mais avec une diminution environ 2Pa.s.

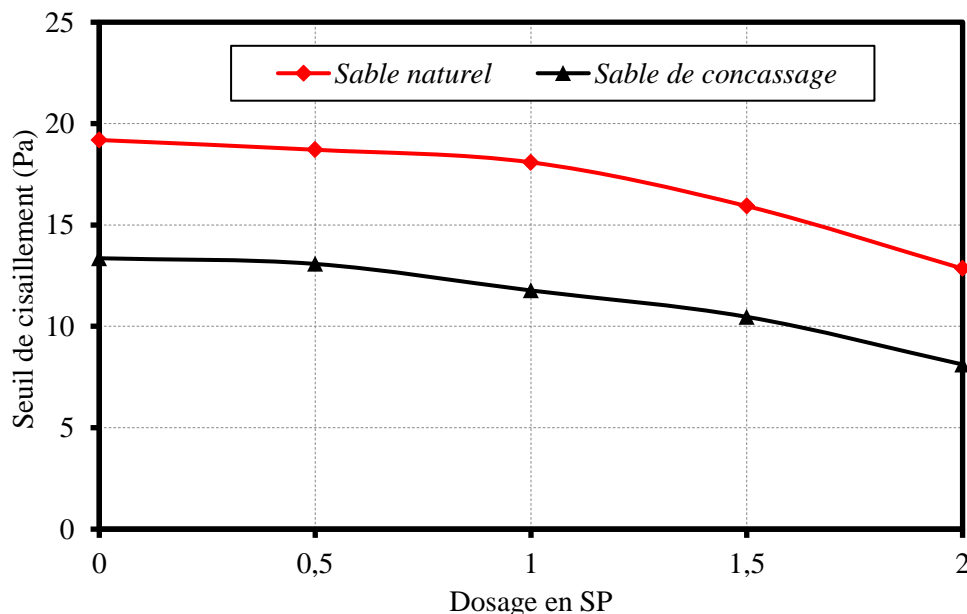


Figure 4.11 :Seuil de cisaillement des mortiers avec deux sables en fonction de dosage en superplastifiant.

Pour les mortiers adjuvantés par 0.5% de superplastifiants, le seuil de cisaillement du mortier avec du sable de concassage engendre une baisse de 26 % par rapport au mortier du sable naturel et engendre une baisse de 30% pour la viscosité plastique. Le mortier du sable de concassage devient plus fluide et son seuil de cisaillement diminue

linéairement même sans l'ajout de superplastifiant. Ceci peut être expliqué par la présence des fillers calcaire dans le sable de concassage. Ainsi, L'effet des superplastifiants, sur le seuil de cisaillement, reste considérable et sa variation suit une chute linéaire avec le dosage en superplastifiant.

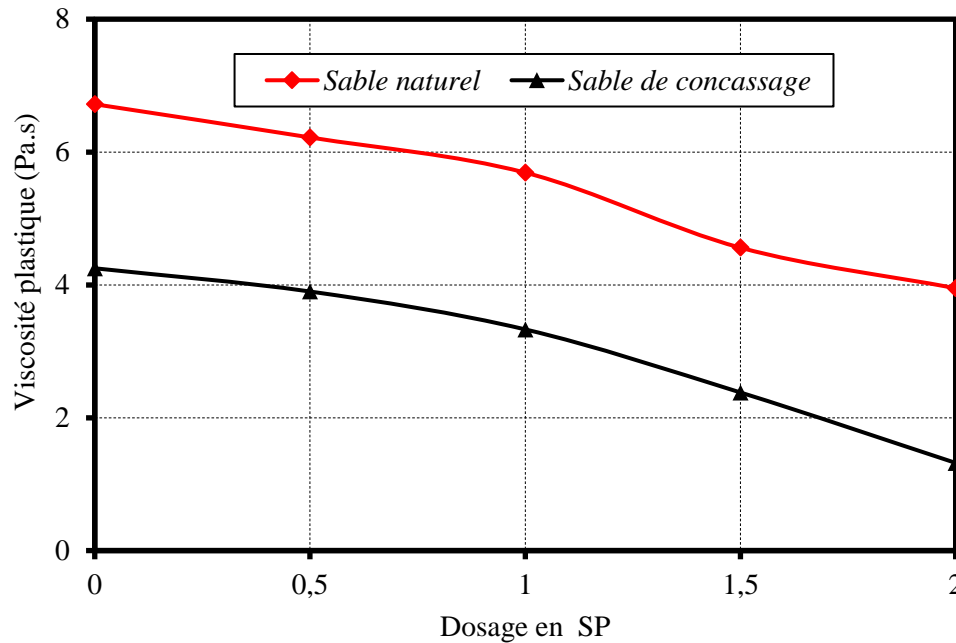


Figure 4.12: Viscosité plastique des mortiers avec deux sables en fonction de dosage en superplastifiant.

4.3.3. Besoin en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques des mortiers

Les figures 4.13, 4.14 montrent la variation des paramètres rhéologique des mortiers avec et sans utilisation de dosage en superplastifiant. On remarque que lorsqu'on augmente le taux de la substitution de SN par SC, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique diminue d'une façon significative pour les mortiers avec et sans superplastifiant. Ainsi, les mortiers avec superplastifiant présentent des valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité plus faibles que les mélanges des mortiers sans superplastifiant. Donc on peut conclure que l'utilisation de superplastifiant dans les tous mélanges de mortier diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

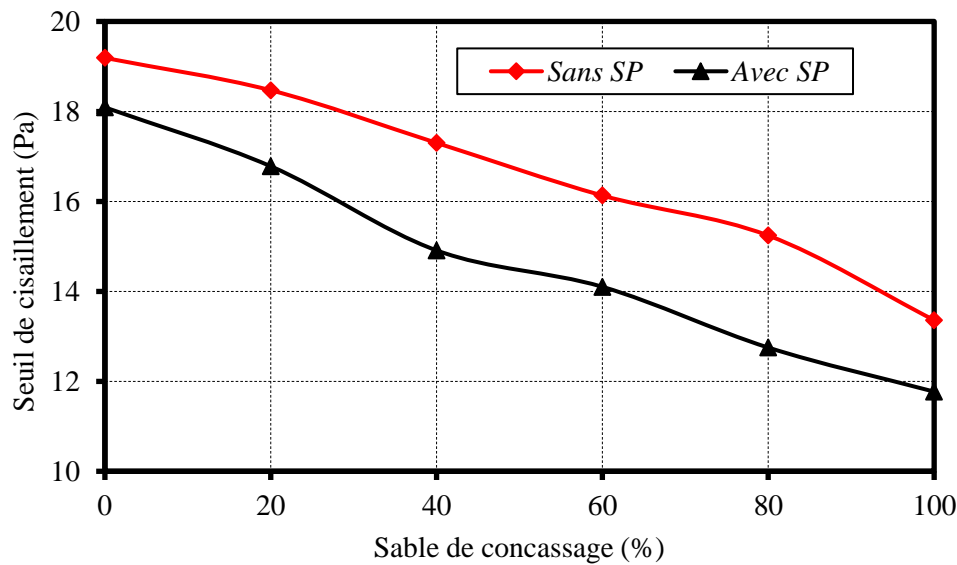


Figure 4.13: Seuil de cisaillement des mortiers avec et sans superplastifiant en fonction de taux du sable de concassage.

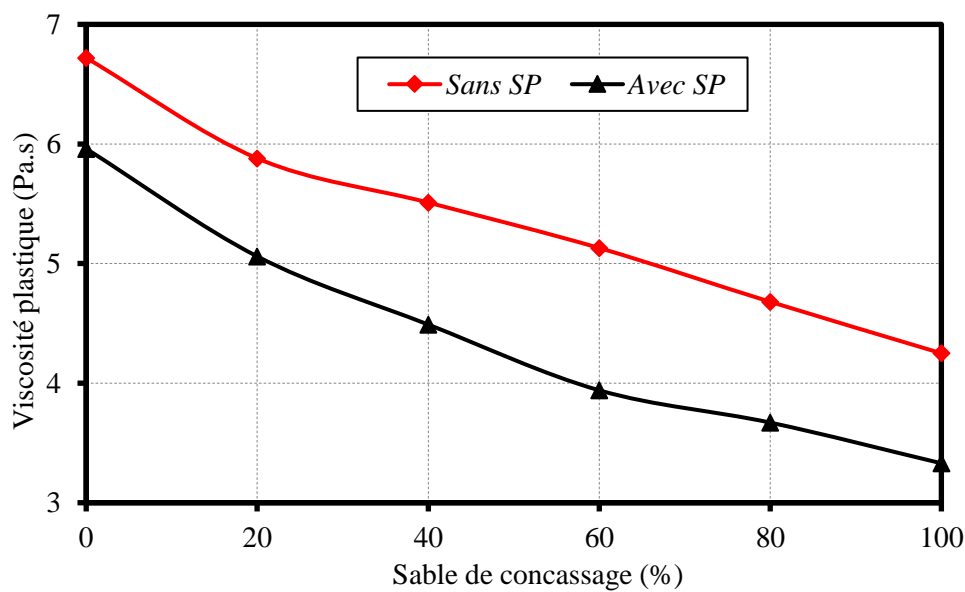


Figure 4.14: Viscosité plastique des mortiers avec et sans superplastifiant en fonction de taux du sable de concassage.

4.4. Discussion des résultats

Il est évident que le mortier à base du sable de concassage présente un comportement rhéologique différent que celui du mortier à base du sable naturel. Cet effet est lié aux caractéristiques de leurs sables telles que la distribution de la taille des particules, la forme, la texture de la surface, la finesse et le pourcentage de fines.

Les résultats d'essais de l'ouvrabilité obtenus montrent que l'ouvrabilité des mélanges du mortier augmente avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage à cause de fillers calcaire contenus dans le sable de concassage qui possèdent un grand pouvoir de dispersion des grains de ciment qui rend le mortier plus fluide. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres chercheurs sur la contribution du sable de concassage sur l'ouvrabilité des mortiers et bétons [118, 72, 107]. En plus, Le calcaire contenu dans le sable de concassage possède évidemment un pouvoir filler et crée un effet de roulement entre les grains de ciment, qui les rendent plus mobiles. De plus, leur activité inerte, à ce stade de l'hydratation, libère une partie d'eau de gâchage qui va contribuer à la lubrification des grains et à améliorer l'ouvrabilité [141]. La forme et la texture de particules du sable de concassage pourraient conduire à une ouvrabilité plus faible que les sables de forme sphériques pour la même teneur en eau et le même volume des pâtes [143, 144 et 136]. Cependant, les fillers de calcaire contenus dans le sable de concassage contribuent à réduire le frottement entre les particules dans la pâte fraîche, augmenter la densité apparente et donc réduire le volume d'eau de remplissage. Les particules fines ($<80\mu$) conduisent à un effet positif sur l'ouvrabilité où la teneur en eau peut être réduite et l'utilisation de superplastifiant devient pas nécessaire. La majorité des résultats de la littérature [143, 144] montrent un effet négatif du sable artificiel sur l'ouvrabilité vis à vis de la forme de leurs surfaces rugueuses. D'autre part, Kou et Poon [145] indiquent qu'une partie de l'eau de gâchage ne pouvait être reprise par les particules du sable de concassage pendant les premiers temps et donc l'excès d'eau contribue augmenter la fluidité.

L'utilisation du sable de concassage dans la composition du mortier, permet de diminuer le rapport E/C avec un dosage de superplastifiant acceptable qui est impossible à effectuer avec le mortier content seulement du sable naturel. Ceci est cohérent avec les résultats trouvés par Chow et al [124], qui ont montré que l'utilisation de sable concassé dans le béton réduit la demande en eau et le besoin en superplastifiant. Burgos et al. [146] ont conclu que le besoin en eau est considérablement diminué lorsque le teneur des fillers de calcaire augmente. Pour un maximum de 30% de fillers de calcaire, la variation de rapport E/C ont été relativement négligeables, aussi bien avec l'absence ou la présence de superplastifiants [146]. Certains chercheurs [65, 66] ont confirmé que le ciment contenant de calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments

pouzzolaniques. L'effet bénéfique du sable calcaire concassé a été attribuée à la taille et la dispersion de ses particules, susceptible d'occuper les petits vides entre les particules de ciment qui augmentent la densité apparente, libèrent l'eau de remplissage et de réduisent le dosage de superplastifiant [141].

L'introduction du sable de concassage dans la composition du mortier concède une meilleure ouvrabilité, permet d'économiser l'utilisation excessive de superplastifiant et rend quelques mortiers à faibles rapport E/C plus pratiques. Il est connu que le dosage de superplastifiant augmente pour le ciment plus fin, mais elle reste adsorbée préférentiellement sur les phases aluminates et peu sur les phases de silicate. Le fillers calcaire contenue dans le sable de concassage ne contient pas les phases aluminates. Ce fillers joue un rôle positif dans la dispersion des grains et compense la réduction du dosage en superplastifiant. En plus, la taille de fines de ces particules contribue à combler les vides entre grains de ciments et libère l'eau emprisonnée dans les interstices ce qui augmente l'épaisseur du film d'eau et améliore l'ouvrabilité [141]. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Zhu et Gibbs [142], où pour 25% de l'addition de fillers de calcaire, le dosage de superplastifiant nécessaire pour produire un mélange d'affaissement de 600-650mm était d'environ 2,2%, comparativement à un peu plus de 1,2% au plus de 55% des fillers calcaire. Ceci peut être expliqué par la demande plus élevée de superplastifiant pour le ciment Portland que pour les fillers de calcaire.

A partir des résultats d'essais de rhéologie, on peut conclure que les valeurs de seuil de cisaillement et de la viscosité plastique diminuent chaque fois qu'on augmente le rapport E/C ou le taux du sable de concassage. Cette diminution des paramètres rhéologiques peut être expliquée par la quantité des fines présentes dans le sable de concassage qui remplissent le déficit en élément fins dans le sable naturel. Dans cette étude le pourcentage des particules fines dans le sable de concassage atteint jusqu'à 15%. Leur contribution à améliorer la maniabilité du mortier et les paramètres rhéologiques est en relation avec rapport E/C utilisé, ce qui est conforme avec les résultats trouvé par Yahia et al. [87] où l'effet de filler calcaire est principalement affectée par le rapport E/C et la teneur en filler calcaire utilisé. D'autres recherches [147, 148] indiquent que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des mortiers sont très influencés par la forme des particules ajoutées. En outre, l'utilisation de filler calcaire peut améliorer l'aspect physique ou chimique des mélanges cimentaire. Certains effets physiques sont associés à la petite

taille des particules de calcaire, ce qui peut améliorer la compacité de mélange, de réduire le vide interstitiel et libérer l'eau piégée dans le système. L'utilisation d'un squelette granulaire continu est rapportée pour réduire le volume de fines nécessaire pour assurer une déformabilité suffisante du béton [149]. Certaines études [83, 84] ont confirmé que les fines de calcaire améliorent significativement la fluidité et réduisent le seuil de cisaillement de mortier. De même, Wenzhong et al [147] ont conclu que la viscosité et le seuil de cisaillement peuvent être améliorés en présence de fillers dans le quelle seuil de cisaillement du mortier commence à augmenter linéairement pour un taux de fines calcaire supérieur à 16%. D'autre part, Adjoudj et al. [141] montrent que lorsque le ciment contient moins de 10% de fillers calcaire, la viscosité de la pâte de ciment sans superplastifiant est réduite, avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse 10%.

4.5. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette phase expérimentale sur l'effet d'introduire le sable de concassage comme alternative du sable naturel sur les propriétés rhéologiques des mortiers, ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'utilisation du sable de concassage dans le mortier améliore l'ouvrabilité et permet d'économiser l'utilisation excessive de superplastifiant. Le mélange M₅ composé totalement du sable de concassage présente une meilleure ouvrabilité et nécessite moins de superplastifiant pour un rapport eau/ciment constant.
- Le mortier à base du sable naturel a besoin d'un rapport E/C égal à 0.66 pour atteindre un étalement de 80%, tandis que le mortier avec 100% du sable de concassage atteint cette valeur avec un rapport E/C égal à 0,6. Il est à noter qu'on gagne 1% du rapport E/C chaque fois qu'on substitue le sable naturel par 20% du sable de concassage.
- Le dosage en superplastifiant diminue lorsque le remplacement du sable naturel par le sable de concassage augmente. Une réduction de 0.66, 0,33 et 0.25% en superplastifiant a été observée pour chaque 20% du sable de concassage introduit dans le mortier pour des rapports E/C de 0,4, 0,5 et 0,6 respectivement. Ainsi,

l'utilisation du sable de concassage dans le mortier nécessite moins de superplastifiant et rend quelques mortiers à faible rapport E/C plus pratique.

- les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité plastique diminuent chaque fois que le rapport E/C ou taux du sable de concassage augmente. Une augmentation du taux de substitution de 0% à 100% réduit le seuil de cisaillement de 25%, 23% et 20% et réduit la viscosité plastique de 22%, 28% et 23% respectivement pour le rapport E/C égal à 0,4, 0,5 et 0,6 .

Chapitre 05

Les propriétés mécaniques des mortiers à base de sable de concassage

5.1. Introduction

Les propriétés mécaniques d'un mortier sont intrinsèques à celles du béton. Pour cela cette étude a été étendue vers l'évaluation expérimentale des propriétés mécaniques d'un mortier contenant différents taux de sable de concassage. La résistance à la compression et celle à la flexion sont mesurées pour des mortiers ayant la même ouvrabilité par l'ajustement du dosage en superplastifiant. Les mortiers sélectionnés présentent un comportement plastique correspondant à un étalement de 80% mesuré sur la table à secousses. Une corrélation de ces propriétés a été menée pour appuyer l'analyse et la discussion de ces résultats.

5.2. Résistance à la compression

Le développement de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage avec différents rapport E/C est récapitulé au tableau 5.1 et illustré sur les figures 5.1, 5.2 et 5.3. D'après ces résultats, on constate que la résistance à la compression des mortiers augmente avec l'âge et le taux du sable de concassage introduit dans le mortier. Le mélange de mortier M₅ confectionné uniquement avec le sable de concassage présente la meilleure résistance à la compression pour tous les âges et tous les rapports E/C. Cette augmentation est due principalement à l'évolution de l'hydratation avec le temps.

Au jeune âge, l'augmentation de la résistance à la compression est considérable notamment pour les mélanges des mortiers contenant plus de sable de concassage, qui enregistre un développement de 60% à 80%. En plus, chaque fois qu'on substitue 20% du sable naturel par le sable de concassage la résistance augmente d'ordre de 6% à 3 jours et de 10% à 7 jours. Par ailleurs, à l'âge de 7 jours, le mortier contenant uniquement du sable de concassage présente une amélioration de la résistance à la compression de 23, 8 et 9.4 MPa respectivement pour un rapport E/C de 0.4, 0.5 et 0.6 en comparaison avec celle du mortier au sable naturel. En revanche, cette amélioration n'est que de 18.6, 7.8 et 5 MPa à 3 jours. Ceci est dû à l'accroissement de l'hydratation du ciment causée par la présence des fines calcaires.

A long terme, le développement de la résistance à la compression des différents mélanges du mortier est très sensible et varie de 20 à 30%. Le mortier avec 100% du sable de concassage présente une résistance de 40.2, 35.4 et 26.4 MPa respectivement pour un rapport E/C de 0.4, 0.5 et 0.6 à l'âge de 28 jours. A 90 jours de cure, ce mortier atteint une résistance de 41, 37 et 29 MPa pour les mêmes rapports E/C. Cependant, Une augmentation des taux de substitution de 0% à 100% augmente la résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 28%, 19% et 39% et à 90 jours de 27%, 12% et 38% respectivement pour un rapport E/C égal à 0,6, 0,5 et 0,4. Donc, on peut dire que le remplacement partiel ou total du sable naturel par le sable de concassage dans un mortier présente une résistance à la compression plus supérieure que celle avec du sable naturel seul.

Tableau 5.1: Résultats des essais de résistance à la compression des mortiers à base du sable de concassage

Taux (%)	Résistance à la compression (MPa)				
	E/C=0.6				
	1 jour	3jours	7jours	28jours	90jours
0	3.12	11.37	14.37	19.14	20.93
20	3.86	12.17	17.03	21.87	23.12
40	4.81	12.96	18.90	23.84	24.62
60	5.31	13.56	20.15	24.75	25.37
80	6.12	14.63	22.18	26.14	26.87
100	6.81	16.43	23.75	26.40	28.75
	E/C=0.5				
0	4.84	16.35	21.25	28.75	32.48
20	6.56	18.43	22.18	30.87	32.56
40	7.29	20.72	23.34	32.16	34.06
60	7.90	21.71	26	33.62	35.70
80	9.21	22.34	28.12	34.68	36.40
100	10.34	24.12	29.37	35.37	36.87
	E/C=0.4				
0	1.5	12.37	16.56	24.37	25.31
20	3.1	21.00	25.75	31.37	33.75
40	7.25	26.62	33.9	35	37
60	11.25	28.12	36.7	37.4	39.37
80	12.6	29.33	38.3	39.53	40.12
100	13.5	30.93	39.68	40.2	41.00

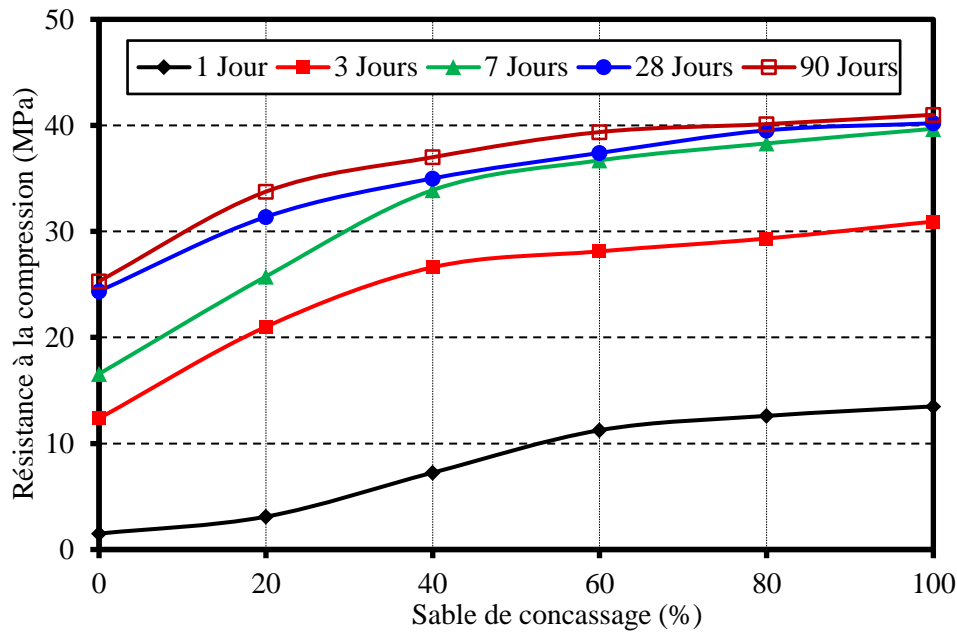


Figure 5.1 : Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour un $E/C=0,4$.

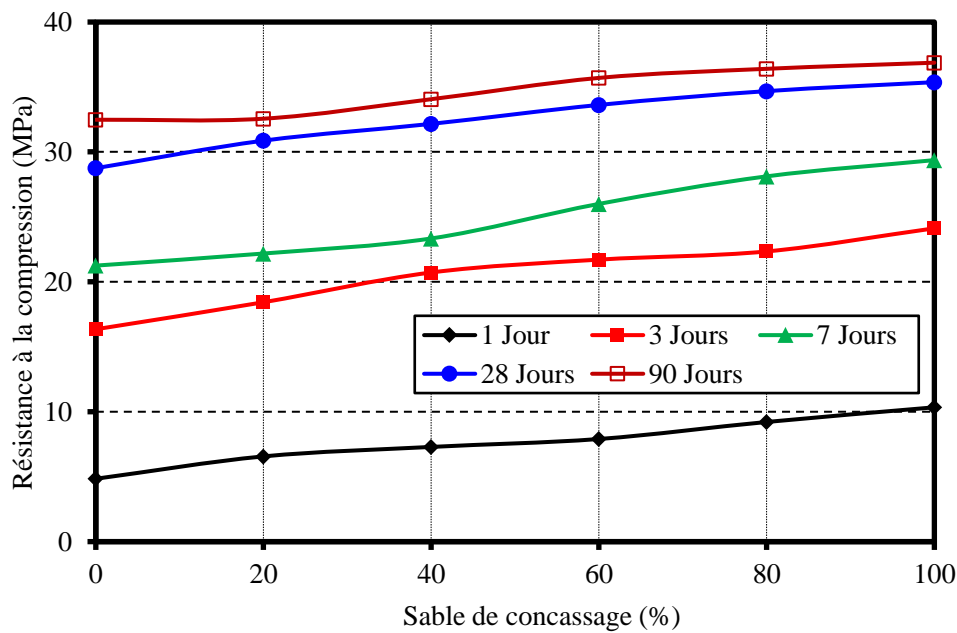


Figure 5.2 : Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour un $E/C=0,5$.

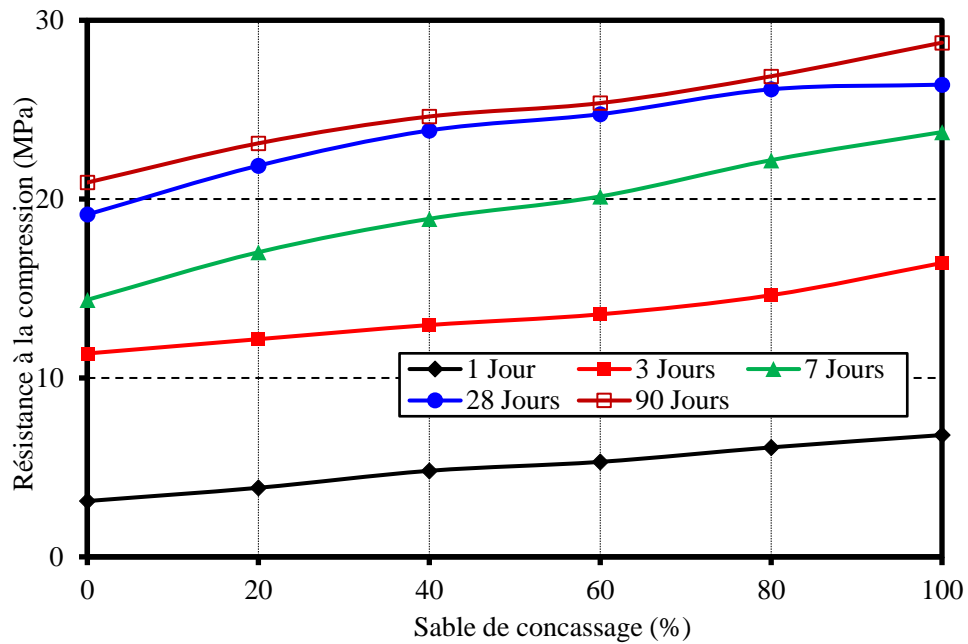


Figure 5.3: Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC pour un E/C=0,6.

La figure 5.4 présente l'influence du rapport E/C sur la résistance à la compression des différents mélanges de mortiers. On observe que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage du sable de concassage dans le mortier. Le mortier contenant 100% du sable de concassage induit une résistance à la compression la plus élevée pour tous les trois rapports E/C. On constaté aussi que la résistance à la compression du mortier confectionné avec 20% ou plus du sable de concassage augmente linéairement avec la diminution de rapport E/C, par contre le mélanges du mortier M₀ contenant seulement du sable naturel et un rapport E/C de 0.4 présente une résistance à la compression inférieure à celle avec un rapport E/C de 0.5. Ceci met en évidence l'effet néfaste du surdosage en superplastifiant utilisé, qui dépasse le taux toléré de 2.5%, cet effet est plus remarquable au jeune âge comme présenté au tableau 5.1. Ainsi pour confectionner un mortier avec de faibles rapports E/C, il est intéressant d'utiliser des remplacements partiels en sable de concassage que de recourir à l'utilisation de dosages excessifs en superplastifiant.

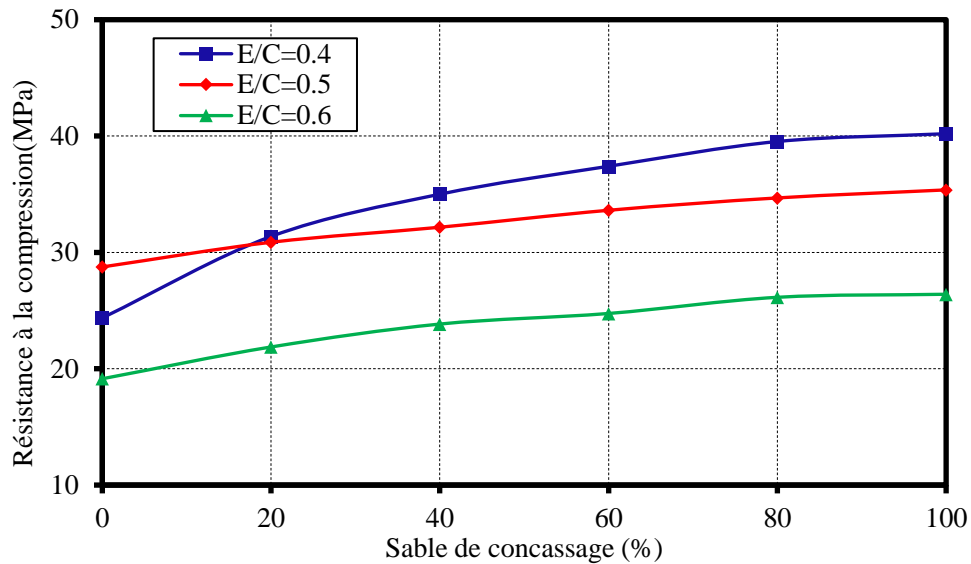


Figure 5.4: Résistance à la compression du mortier à l'âge de 28 jours en fonction du taux de substitution de SN par SC pour divers rapports E/C.

5.3. Prédiction de la résistance à la compression

Pour prédire la résistance à la compression du mortier contenant une certaine proportion de sable de concassage, le modèle de Ferret a été utilisé et qui se base sur la relation suivante:

$$S = \frac{K_f}{\left[1 + (1+y)d_c \frac{E}{C}\right]^2} \quad (5.1)$$

Où C et E sont les poids de ciment et d'eau, d_c est la masse volumique du ciment ($d_c = 3,1$) et y est un coefficient qui dépend de la consistance du mortier ($y = 0,1$ pour une consistance normale) [150]. K_f est le coefficient variant selon le squelette granulaire et la classe de ciment à un âge donné. Si on applique une corrélation des résultats de la résistance à la compression des différents mortiers par cette équation, on peut voir une grande dispersion et un coefficient de corrélation très faible comme indiqué la figure 5.5. Le coefficient K_f , exprimée dans l'équation (5.1), doit tenir compte de la teneur du sable de concassage, ce dernier semble avoir un grand effet sur le développement de la résistance mécanique du mortier.

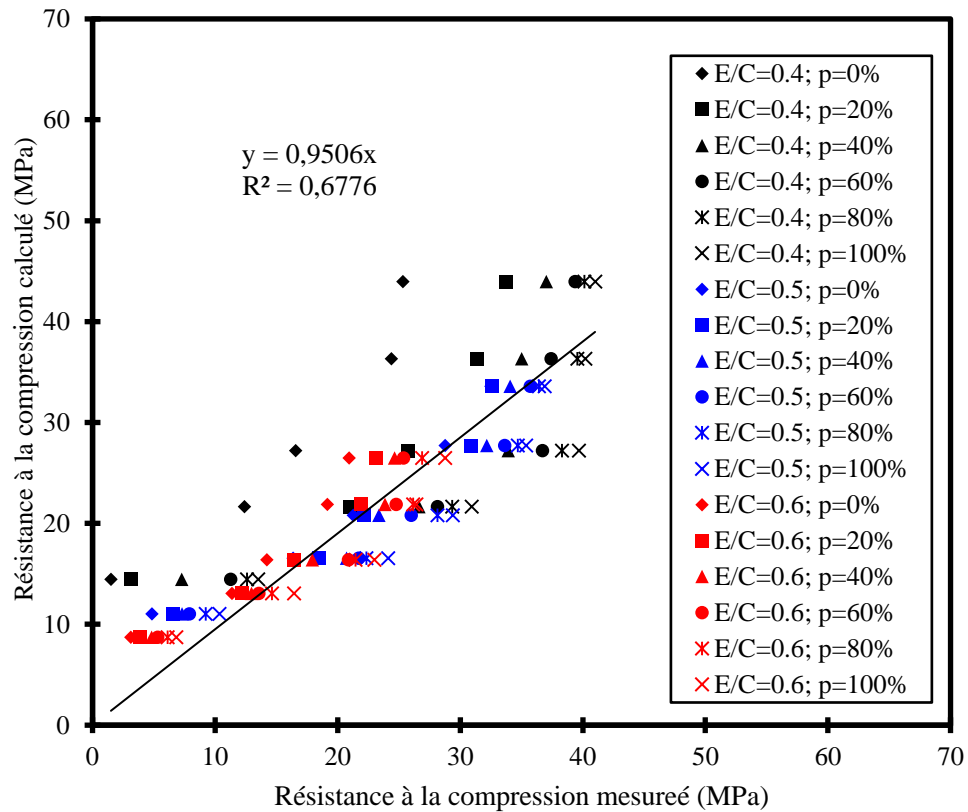


Figure 5.5 : Relation entre la résistance à la compression mesurée et calculé pour divers mortiers utilisés.

Afin de disposer un modèle général pour prédire la résistance du mortier avec divers proportions de sable de concassage, plusieurs relations sont testées pour prédire le coefficient K_f et contribuer à généraliser le modèle de Feret. Equation 5.2 exprime une généralisation du modèle Feret avec l'introduisant du pourcentage du sable de concassage et l'âge de cure des mortiers. La relation peut être exprimée par l'équation suivante :

$$R_{cal} = \frac{(55p+40)[1.2 + (1-0.45p) \ln(t)]}{\left[1 + (1+y)d_c \frac{E}{C}\right]^2} \quad (5.2)$$

Où p représente le taux de remplacement du SN par SC et t l'âge de mortiers en jours. La figure 5.6 illustre une relation linéaire entre les valeurs expérimentales de la résistance à la compression et celles trouvées par l'équation 5.2. Le coefficient de corrélation entre les valeurs calculées et mesurées est égal à 0,85; supérieur à celui obtenu

par la simple équation 5.1. Il est bien observé que les résultats des résistances à la compression avec un rapport E/C de 0,4 sont les plus incohérentes à cause des dosages excessifs utilisés en superplastifiant. Le coefficient de corrélation peut atteindre $R^2=0,9$ lorsque le test est effectué sans des résultats correspondant à un rapport E/C de 0,4.

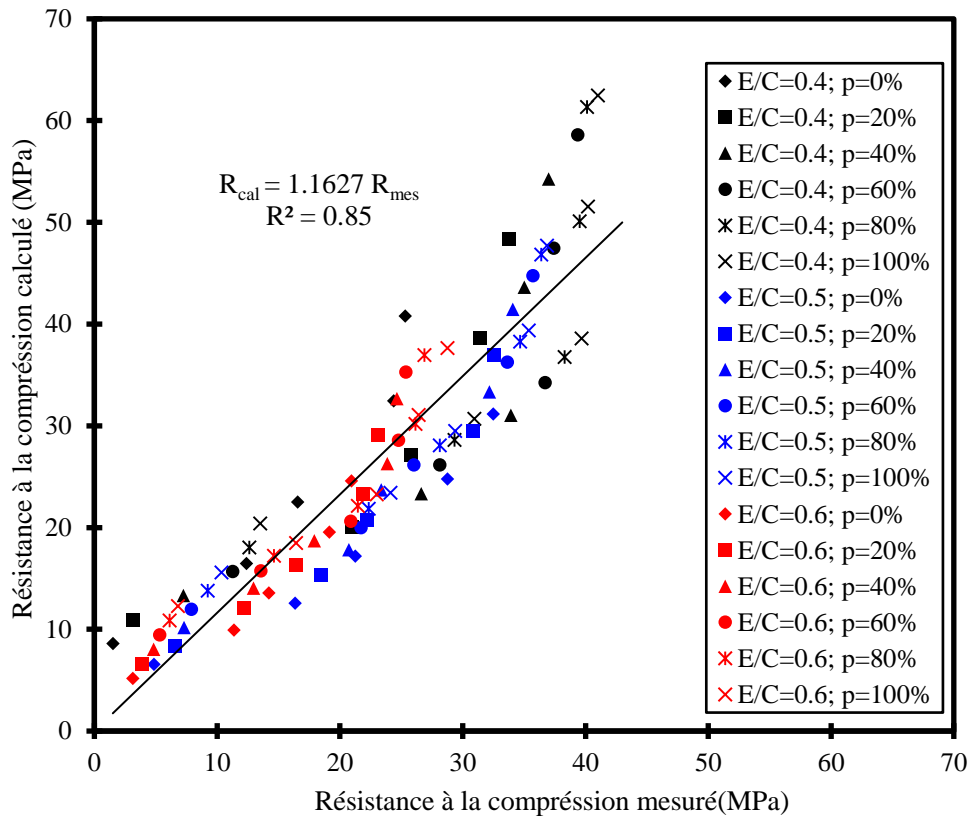


Figure 5.6 : Relation entre la résistance à la compression mesurée et calculée pour divers mortiers utilisés.

5.4. Discussion du modèle

Ce nouveau modèle exprime le coefficient K_f défini par Féret par une fonction logarithmique de temps et une fonction polynomiale du taux de sable de concassage. Le dosage en superplastifiant est limité par des normes pour éviter les effets néfastes. Quand le superplastifiant est utilisé avec des dosages appropriés, son effet sur la résistance à la compression au jeune âge est négligeable et le modèle exprimé par l'équation 5.2 est plus fiable. Cette équation reste valable tant que le dosage de superplastifiant ne dépasse pas une valeur critique. L'équation 5.2 est une expression améliorée de celle proposée par Féret et qui prend en compte la combinaison du sable de concassage et du sable naturel dans la composition du mortier. L'effet du rapport E/C et la consistance du mortier sont maintenus inchangés tels qu'ils sont exprimés dans le dénominateur du modèle original de

Feret (équation 5.1). La formule ajoutée dans cette nouvelle relation polynomiale exprime l'effet du rapport du sable de concassage utilisé dans le mortier. Il prend une forme linéaire à l'âge de 1 jour et donne au mortier avec du sable concassé une double résistance à la compression par rapport au mortier avec seulement du sable naturel. A long terme, cette expression présente une réduction de l'amélioration de la résistance à la compression avec le sable de concassage où seulement 50% de gain est observé à 90 jours.

5.5. Résistance à la traction par flexion

L'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du sable naturel et les différents rapport E/C aux échéances d'âges de 1, 3, 7,28 et 90 jours, est présentée dans le tableau 5.2 et illustrée sur les figures 5.7, 5.8 et 5.9. Les résistances à la traction évoluent d'une manière semblable à celle de la résistance à la compression. On constate une augmentation de la résistance à la traction avec l'augmentation de l'âge et le taux du sable de concassage introduit dans le mortier. Cette augmentation est due à l'évolution de l'hydratation des gains de ciment avec le temps. Le mélange du mortier M₅ confectionné simplement par du sable de concassage présente une meilleure résistance à la traction pour tous les âges et tous les rapports E/C. On note que les résultats de la résistance à la traction avec un rapport E/C de 0,4 sont les plus incohérents en particulier au jeune âge pour le mélange M₀ à cause des dosages excessifs utilisés de superplastifiant.

Au jeune âge, le développement de la résistance à la traction est plus rapide notamment pour les mélanges des mortiers contenant plus de sable de concassage. Cette augmentation par rapport au mortier de référence M₀ à l'âge de 3 jours, est de l'ordre de 3.5% , 26%, 39.5%, 47% et 52.4% respectivement pour 20, 40, 60, 80 et 100% d'ajouts du sable de concassage et un rapport E/C est égal à 0.5. Ceci est causé par la présence de fillers calcaire dans le sable de concassage qui ont entraîné une accélération de l'hydratation du ciment. Cette effet est généré par l'apparition de sites de nucléation dans la matrice créés par les fines calcaires.

A long terme, l'augmentation du taux de substitution de 0% à 100% augmente la résistance à la traction par flexion à 28 jours de ordre de 32%, 25% et 31% et à l'âge de 90 jours de l'ordre de 23%, 21% et 22% respectivement pour des rapports E/C égaux à 0,6, 0,5 et 0,4. Cependant, à 90 jours, le mortier contenant uniquement du sable de concassage

atteint une résistance de 9.3, 8.9 et 7.6 MPa respectivement pour un rapport E/C de 0.4, 0.5 et 0.6. Cette performance peut être expliquée par l'effet physique des particules de calcaire sur le développement de la résistance des mortiers de ciment. L'augmentation de la résistance à la traction par flexion, est de l'ordre de 7% chaque fois qu'on substitue le sable naturel par 20% du sable de concassage au mortier.

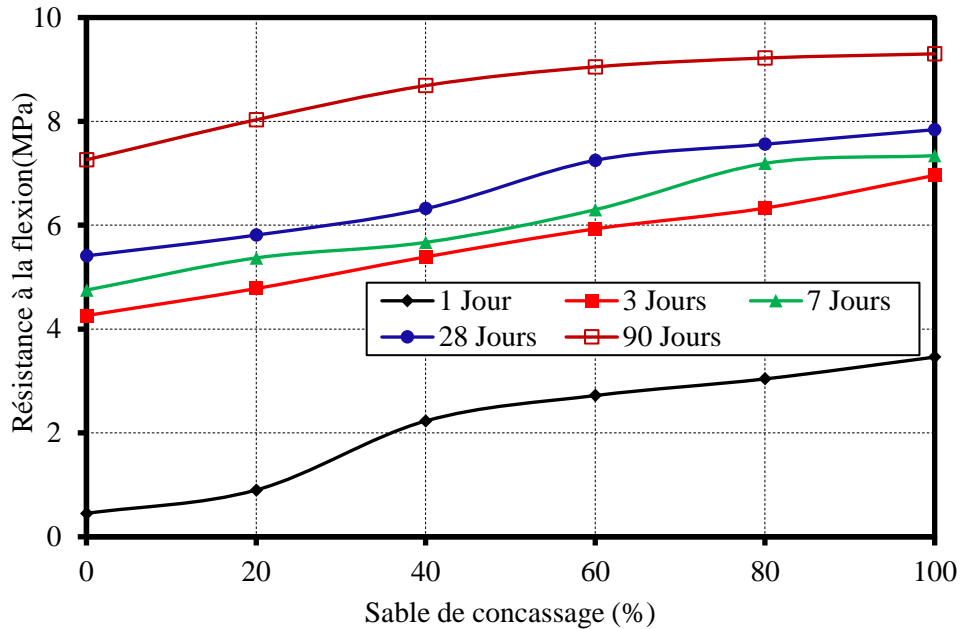


Figure 5.7: Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC avec E/C = 0,4

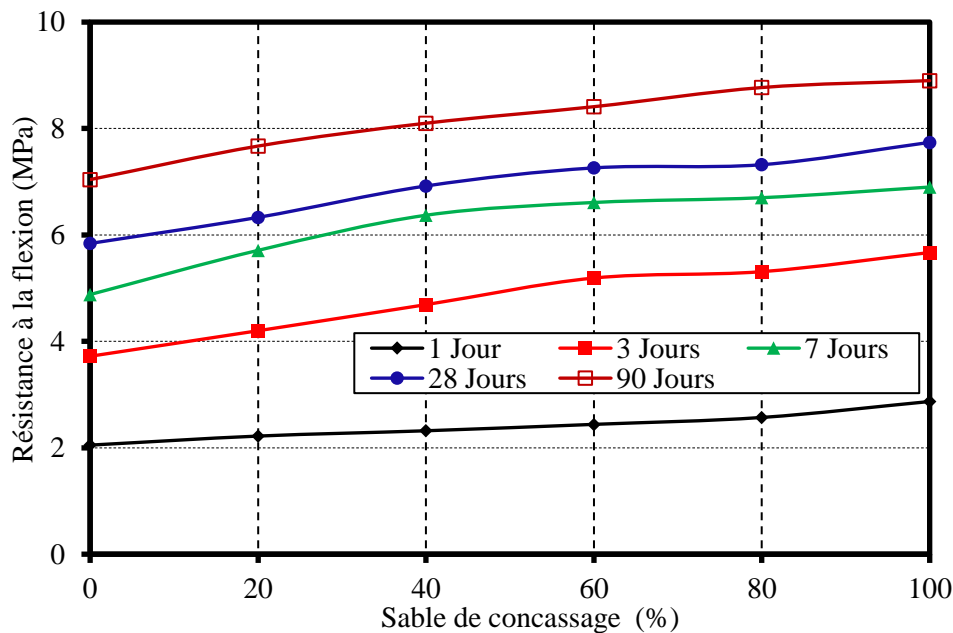


Figure 5.8 : Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC avec E/C = 0,5.

Tableau 5.2: Résultats des essais de résistance à la flexion des mortiers à base du sable de concassage

Taux(%)	Résistance à la flexion (MPa)				
	E/C=0.6				
	Un jour	3jours	7jours	28jours	90jours
0	1.4	3.34	4.43	4.89	5.91
20	1.54	3.76	4.90	5.26	6.12
40	1.64	4.22	5.26	5.78	6.55
60	1.77	4.44	5.42	6.04	6.98
80	1.88	4.65	5.71	6.42	7.29
100	2.05	4.75	6.19	7.20	7.63
	E/C=0.5				
0	2.05	3.72	4.88	5.84	7.04
20	2.22	4.20	5.71	6.33	7.67
40	2.32	4.69	6.37	6.92	8.1
60	2.44	5.19	6.61	7.26	8.41
80	2.57	5.31	6.70	7.32	8.77
100	4.87	5.67	6.90	7.74	8.9
	E/C=0.4				
0	0.45	4.26	4.75	5.41	7.26
20	0.9	4.78	5.37	5.81	8.03
40	2.23	5.39	5.67	6.32	8.69
60	2.72	5.93	6.30	7.25	9.05
80	3.04	6.33	7.19	7.65	9.22
100	3.46	6.96	7.34	7.84	9.30

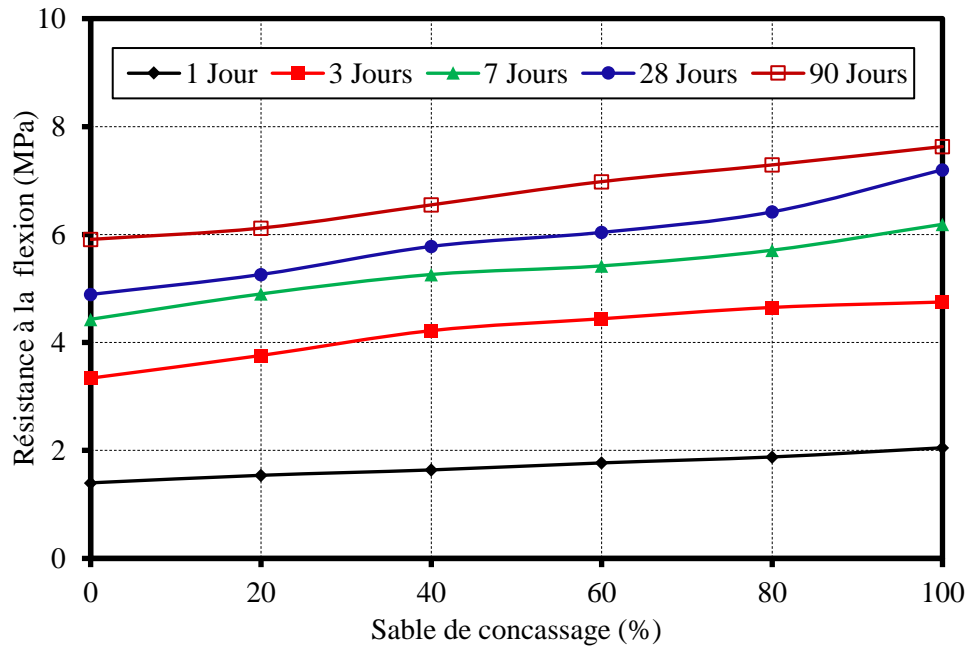


Figure 5.9: Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de SN par SC avec $E/C = 0.6$

5.6. Prédiction de la résistance à la flexion

Pour prédire la résistance à la traction par flexion du mortier contenant une certaine proportion du sable de concassage, l'équation 5.3 exprime une généralisation du modèle de Feret relatif à la résistance à la flexion en introduisant le pourcentage du sable de concassage, le rapport E/C et l'âge de cure des mortiers. La relation peut être exprimée par l'équation suivante :

$$Rf_{cal} = \frac{(14p+10)[1.2 + (1-0.5p) \ln(t)]}{[1+(1+y)d_c \frac{E}{C}]^2} \quad (5.3)$$

Où p représente un taux de remplacement de SN par SC et t l'âge de mortiers en jours. La figure 5.10 présente une relation linéaire entre les valeurs expérimentales de la résistance à la traction par flexion et celles trouvées par l'équation 5.3. Le coefficient de corrélation entre les valeurs calculées et mesurées est égal à 0,82. Ces résultats obtenus sont similaires à ceux observés dans le cas de la résistance à la compression,

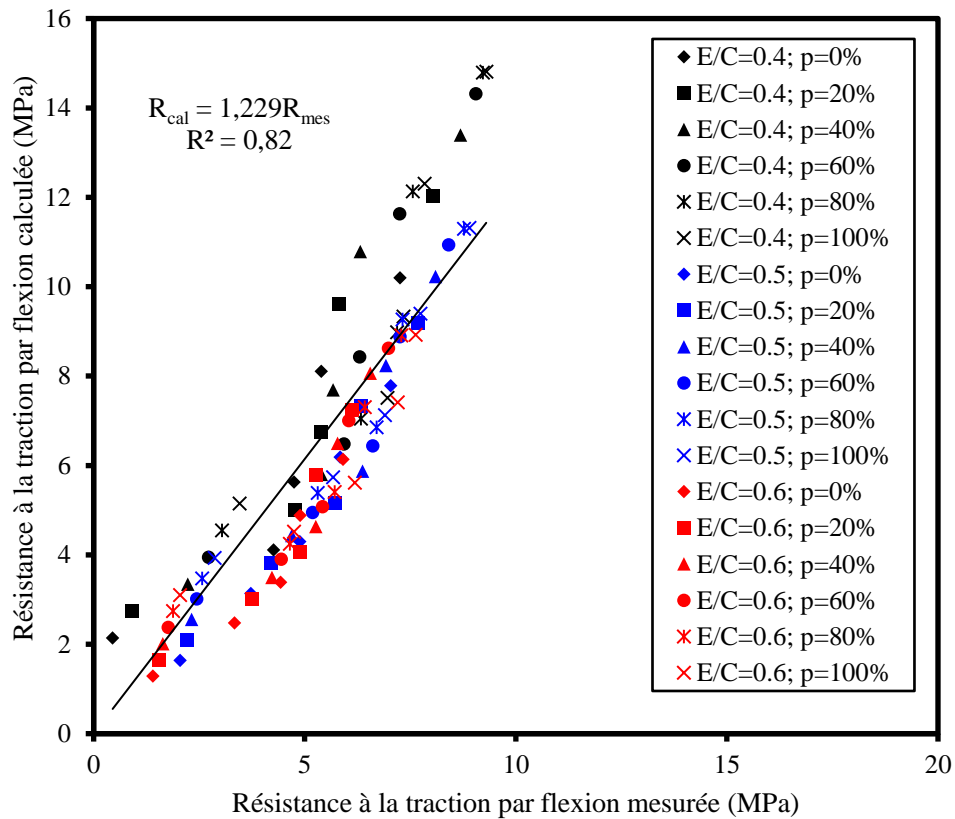


Figure 5.10: Relation entre la résistance à la traction par flexion mesurée et calculée pour divers mortiers utilisés.

5.7. Corrélation entre les résistances à la compression et à la traction par flexion

Afin de permettre la prédiction de la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression, une corrélation entre les deux résistances de cette étude expérimentale a été proposée. Il semble que la relation suivante est la mieux adaptée :

$$R_t = 0.3 R_c^{0.78} \quad (5.4)$$

Où R_f est la résistance à la traction par flexion et R_c est la résistance à la compression en MPa. Selon la figure 5.11, la relation 5.4 corréle parfaitement les données expérimentales avec un coefficient de la corrélation $R^2 = 0.952$. Sachant que les résistances à la flexion sont multipliées par un facteur 0.6 afin d'obtenir la résistance à la traction.

De plus, La comparaison entre les courbes des différentes formules empiriques et la courbe trouvé par notre étude, présente des valeurs généralement très proches à celle de la courbe de corrélation pour des faibles résistances Néanmoins, un léger écart pour des fortes résistances.

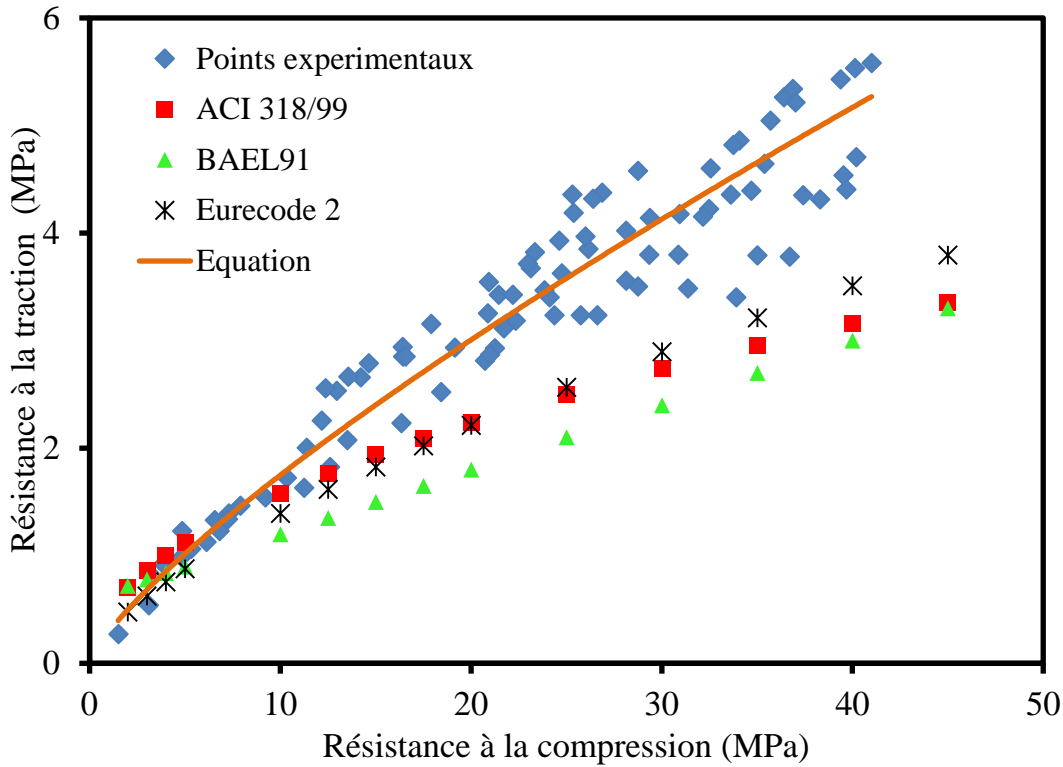


Figure 5.11: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction.

5.8. Discussion des résultats

Il est évident que le mortier à base du sable de concassage présente un comportement mécanique différent que celui du mortier à base du sable naturel. Cet effet est lié à la caractéristique de ce sable telle que la distribution de la taille des particules, la forme, la texture de la surface, la finesse et le pourcentage de fines. Pour les résultats des résistances mécaniques, compression et traction par flexion, on a constaté une nette amélioration avec l'augmentation du taux de substitutions du sable naturel par le sable de concassage au jeune âge et à long terme pour tous les rapports E/C. Cette performance peut être expliquée par l'effet physique des particules du calcaire sur le développement de la résistance des mortiers de ciment. En plus, la diminution de la résistance avec le rapport eau/ciment peut être attribuée à l'augmentation de la porosité capillaire dans le mélange.

La surface lisse et la forme roulé de sable naturel réduit la résistance du mortier par rapport au mortier du sable du concassage. Au cours du processus de broyage, le sable de concassage a des particules rugueuses et des formes angulaires et irrégulières qui augmentent l'adhérence pâte-granulats. Ceci a été confirmé par certains chercheurs [49, 111, 108] qui ont affirmé que la forme angulaire et la surface rugueuse de particules du sable de concassage développent une meilleure adhésion entre l'interaction pâte-agrégats, menant ainsi à une amélioration de la résistance du béton et mortier. En plus, Chanvillard et al. [151] ont montré que la consommation en ciment est plus forte avec les granulats roulés, à cause de sa mauvaise adhérence à la pâte de ciment. Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) est un composant de cimentation le plus important du béton. Il est responsable des propriétés mécaniques du béton y compris le durcissement et le développement de la force. Les micro-fibres de gel C-S-H pénètrent dans les micro-pores de granulats, ils pénètrent facilement dans le sable de concassage en raison de la surface rugueuse que dans les particules de sable de la rivière qui se traduit par plus de résistance [108].

Physiquement, les particules de calcaire peuvent remplir l'espace entre les particules du ciment ainsi que celui entre les grains du sable. Cet effet de remplissage des vides fournit un emballage plus efficace de la phase solide des mortiers de ciment et en résulte une amélioration de la résistance au jeune âge. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs, qui ont montré que l'utilisation du sable de concassage au béton ou mortier augmente la résistance à la compression et la résistance à la flexion [124, 60, 135, 91, 107]. D'autres chercheurs [75, 152], ont justifié l'amélioration de la résistance aux jeunes âges par l'accélération de l'hydratation du C₃S en particulier lorsque la finesse du calcaire devient plus fine. Cependant, l'augmentation de la résistance à la compression à des taux faibles de remplacement du sable naturel par le sable de concassage peut aussi être attribuée aux particules du calcaire qui agissent comme des sites de nucléation dans les cristaux de C-H [100]. Les nouveaux sites de nucléation créés par les fines de calcaire présentes dans le sable de concassage fournissent mieux la possibilité aux particules de ciment de former des produits d'hydratation C-S-H supplémentaires. Cette contribution permet d'accélérer l'hydratation du ciment dans le mortier contenant une proportion du sable de concassage et donne plus de produits d'hydratation.

5.9. Conclusion

A travers les résultats obtenus dans cette phase expérimentale sur l'effet d'introduire le sable de concassage comme alternative du sable naturel sur les propriétés mécaniques des mortiers, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La résistance à la compression des mortiers augmente avec l'âge et le taux du sable de concassage introduit dans le mortier. L'augmentation de la résistance est considérable, en particulier pour les mélanges contenant plus du sable de concassage. Le mortier M₅ confectionné uniquement par le sable de concassage possède une meilleure résistance à la compression pour tous les âges et tous les rapports E/C. A l'âge de 28 jours, ce mortier a atteint une résistance à la compression de 40.2, 35.4 et 26.4 MPa respectivement pour rapport E/C de 0.4, 0.5 et 0.6. Pour les mêmes rapports E/C, les valeurs enregistrées de la résistance à la compression est 41, 37 et 29 MPa à 90 jours.
- L'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage augmente la résistance à la traction par flexion des mortiers au jeune âge et à long terme pour tous les rapports E/C. Une amélioration considérable de la résistance à la traction est notée avec le mélange M₅ confectionné seulement avec du sable de concassage. L'augmentation du taux de substitution de 0% à 100% augmente la résistance à la traction par flexion à 28 jours de ordre de 32%, 25% et 31% et à l'âge de 90 jours de l'ordre de 23%, 21% et 22% respectivement pour des rapports E/C égaux à 0,6, 0,5 et 0,4.
- L'utilisation du sable de concassage dans le mortier ou béton est souhaitable en raison des avantages tels que l'élimination utile d'un sous-produit, la réduction de la consommation du sable naturel et l'augmentation de la résistance mécanique.

Conclusions générales et recommandation

Conclusions Générales

Cette étude a été menée pour évaluer l'effet du remplacement partiel et total du sable naturel par le sable de concassage sur la résistance mécanique, l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques du mortier. A travers les résultats obtenus, nous pouvons en tirer les conclusions suivantes :

- Comparativement au sable naturel qui a une forme arrondie et une texture de surface lisse ; le sable concassé a une forme angulaire et une texture de surface rugueuse. De coup, le sable de concassage contient une teneur en particules fines qui peut atteindre un taux de 15% contrairement au sable naturel qui ne contient que 1%. Cette haute teneur en particules fines a un effet significatif sur les propriétés du mortier à l'état frais et durci.
- Les mortiers contenant du sable de concassage présentent une meilleure ouvrabilité et ont besoin de moins de dosage en superplastifiant. Donc, une amélioration systématique de l'ouvrabilité est observée dès que le taux en sable de concassage augmente.
- Le sable de concassage est très bénéfique et fait augmenter l'étalement du mortier de 10% et gagner 1% du rapport E/C pour chaque 20% du sable substitué. Aussi, on gagne 0,33 % de superplastifiant pour le mortier avec un rapport E/C= 0,5. Le mortier à base du sable de concassage adjuvantés par 0.5% de superplastifiants, engendre une baisse de 28 % des paramètres rhéologiques par rapport au mortier du sable naturel.
- Les paramètres rhéologiques varient sensiblement avec chaque taux du sable de concassage et dépendent de ses propriétés leur interaction avec le superplastifiant et le rapport E/C. Les valeurs de seuil de cisaillement et la viscosité plastique des mortiers diminuent, sensiblement, avec l'augmentation de taux du sable de concassage ajoutés. Cependant, l'effet du sable de concassage est plus important surtout pour un rapport E/C élevé. En outre, le meilleur comportement rhéologique est constaté pour les mélanges contenant seulement du sable de concassage.

- L'utilisation du sable de concassage dans le mélange du mortier comme remplacement du sable naturel augmente la résistance mécanique pour tous les âges et tous les rapports E/C. Cette augmentation est considérable pour les mélanges contenant plus de SC par rapport au mortier normal ne contenant que du sable naturel (d'environ de 30% à 28 jours pour un rapport E/C de 0.6). Ce résultat reste valable tant que la dose en superplastifiant ne dépasse pas un certains dosage critique qui provoque la ségrégation et diminue la résistance au jeune âge.
- Des relations mathématiques sont proposées pour exprimer l'effet du sable concassé sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du mortier avec et sans superplastifiant. L'application de ces relations en comparaison avec les résultats trouvés, donne une grande satisfaction où la corrélation des données est satisfaisante et offre une très grande corrélation, allant de 0,85 à 0,98. Les coefficients de corrélation sont proches de l'unité ce qui justifie la convenance des ces choix.
- Pour la fabrication d'un mortier à faible rapport E/C, il est intéressant d'utiliser des remplacements partiels par un sable de concassage que de recourir à un dosage excessif de superplastifiant. Le sable de concassage améliore l'état frais et durci de mortier qu'il soit utilisé seul ou combiné avec un sable naturel.
- Le sable de concassage constitue une solution idéale pour préserver les ressources alluvionnaires, pour réduire l'impact des exploitations sur l'environnement et ses apports techniques positifs. A cet effet, il représente une alternative intéressante de remplacement du sable naturel dans la confection des mortiers et des bétons.

Recommandations

Pour conclure, on peut recommander de mener des travaux dans la même perspective et mettre l'accent sur le comportement rhéologique du béton lorsque le sable de concassage est introduit, partiellement ou totalement, dans sa formulation. Le sable de concassage utilisé dans notre étude contenait 15% de fines calcaire, il serait, donc, profitable d'axer les futures recherches sur le comportement rhéologique des bétons et des mortiers contenant des fillers calcaires à des taux différents.

Références bibliographiques

Références bibliographies

- [1] Raman SN, Ngo T, Mendis P, Mahmud HB. *High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand*. Construction and building materials, 2011; V 25, pp:3123-3130.
- [2] Kenai S, Menadi B, Ghrici M. *Performance of limestone cement mortar*. 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Montréal, Canada, Paper M8-23, May-June- 2006, pp:39-52.
- [3] Soroka N. *Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement*. Cement and Concrete Research. 1976; V 6, pp:367-376.
- [4] Hudson BP. *Manufactured sand for concrete*. The Indian concrete journal, 1997: pp:237-240.
- [5] Suhas SD. *Manufacturing sand*. Indian concrete journal, 2012; V 86, pp:24-26.
- [6] Charef A. *La problématique des granulats au Maroc*. Push-ButtonPublishing, 2007.
- [7] Francqueville G. *La Technologie du Béton*. Degussa Construction Chemicals France Guf\Formation\Béton\Technobeton, V05, 111 p.
- [8] Maillot R. *Mémento technique des Granulats*. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2001; 166p.
- [9] Norme Française EN 933-1, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage*. AFNOR, 1997.
- [10] Dreux G, Festa J. *Nouveau guide du béton et ses constituants*. Edition Eyrolles, 8^{eme} édition, 1998; 409 p
- [11] Norme Française XP P 18-540. *Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540*, 1997. 35p.
- [12] Norme Française EN 12-620. *Granulats pour béton hydraulique*. 2004.
- [13] Norme Française EN 933-3, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement*.
- [14] Norme Française EN 1097-6. *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Détermination des masses volumiques et de l'absorption d'eau*.
- [15] Norme Française EN 1097-7, *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Détermination de la masse volumique absolue du filler – Méthode au pycnomètre*, AFNOR, 1996.
- [16] Norme Française EN 1097-3. *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Méthodes pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire*, AFNOR, 1996.
- [17] Hachaichi S. *Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et le laitier de hauts fourneaux dans le béton*. Thèse de Magister, Université d'Annaba, 2008; 92p.

- [18] Norme Française EN 933-8. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Evaluation des fines – Equivalent de sable. AFNOR, 1999; 16p.
- [19] Norme Française EN 1097-1. *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval) (indice de classement P 18-650.1)*. AFNOR, 1996.
- [20] Norme Française EN 1097-2. *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation*. AFNOR, 1996.
- [21] Baron J et Sauterey R. *Le béton hydraulique connaissances et pratique*. Presses de l'école des ponts et chaussées sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, 1982; 560p.
- [22] Chanvillard G. *connaissances générale sur le matériau béton*. Edition Aléas. 1999, 169p.
- [23] Vittone R. *Batir manuel de construction*. Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1996; 950p.
- [24] Walther R et Miehlbrad M. *dimensionnement des structures en béton*. Traité de génie civil de l'école polytechniques fédérale de Lausanne, 1990; V 7, 408p.
- [25] Persoz B. *Introduction à l'étude de la rhéologie*. Paris, Dunod, 1960; 271p.
- [26] Beaupré D. *Rheology of High Performance Shotcrete*. PhD thesis, University of British Columbia, Canada, 1994; 265p.
- [27] Couarraze G, Grossiord JL. *Initiation à la rhéologie*. 3ème édition, 2000; 300p.
- [28] Poitou A and Racineux G. *A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspension*. Journal of Rheology, 2001; V 45, pp:609-625.
- [29] De-larrard F, Belloc A. *L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons*. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999; V 219, pp:41-52.
- [30] Tattersall GH and Bloomer SJ. *Further development of the two-point test for workability and extension of its range*. Magazine of Concrete Research, 1979; V31, pp:202-210.
- [31] Wallevik OH. *Rheology a scientific approach to develop self-compacting concrete*. In Proceedings of international RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, 2003; V 33, pp:23-32.
- [32] Coussot P. *Rhéologie des boues et laves torrentielles - Etudes de dispersions et suspensions concentrées*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et Etudes du Cemagref, 1993; 182p.
- [33] Hu C, De Larrard F, Sedran T, Boulay C, Bosc F, Defiorene F. *Validation of btrheom, the new rheometer for soft-to-fluid concrete*. Materials and Structures, 1996; V 29, pp:620-631.
- [34] NF EN 12390-3, *Essai pour béton durci-Résistance à la compression des éprouvettes (indice de classement P18-455)*. Février 2003.
- [35] NF EN 12390-5, *Essai pour béton durci-Résistance à la flexion des éprouvettes (indice de classement P18-433)*. Octobre 2001.

- [36] CIM Béton. *Les ouvrages en béton : durabilité, dimensionnement et esthétique*. Fiches techniques, 2008; 110p.
- [37] Mindess S, Young JF, Darwin D. *Concrete*. 2nd edition, Pearson Education, Upper Saddle River. New Jersey, 2003 ; 644p.
- [38] Neville AM. *Propriétés des bétons*. Centre de Recherche Inter universitaire (CRIB), Edition Eyrolles, 2000; 806p.
- [39] Jamkar SS, Rao CBK. *Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning*. Cement and concrete research, 2004; V 34, pp:2021-2027.
- [40] Quiroga P, Fowler D. *The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete*. International Center for Aggregates Research, 2004; 382p.
- [41] Westerholm M. *Rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate*. Department of Chemical Engineering and Geosciences, Licentiate , Luleå University of Technology, Stockholm, 2006; 198p.
- [42] Topličić ĆG, Grdić Z, Despotović I, Ristić N. *Influence of crushed stone aggregate type on concrete consistency*. Architecture and Civil Engineering University of Niš, Serbia, 2010; V 8, pp:99-109.
- [43] Abdullahi M. *Effect of aggregate type on Compressive strength of concrete*. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2012; V 2, pp:792-800.
- [44] Westerholm M, Lagerblad D, Silfwerbrand J, Forssberg E. *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*. Cement and Concrete Composites, 2008; V 30, pp:274-282.
- [45] Banfill PFG. *Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials*. Construction & Building Materials. 1994; V 8, pp:43-50.
- [46] Alhozaimy AM. *Correlation between materials finer than no. 200 sieve and sand equivalent test for natural and crushed stone sands*. Cement Concrete Aggregates. 1998; V20, pp:221–226.
- [47] Neno C, Brito J, Veiga R. *Using fine recycled concrete aggregate for mortar production*. Materials Research, 2014; V 17, pp:168-177.
- [48] Juan MS, Gutiérrez PA. *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, 2009; V 23, pp:872-877.
- [49] Donza H, Cabrera O, Irassar EF. *High-strength concrete with different fine aggregate*. Cement Concrete Research. 2002; V 32, pp:1719-1729.
- [50] Özkan O, Yuksel I, Muratoglu O. *Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag*. Waste Management, 2007; V 27, pp:161-167.
- [51] Kılıc A, Atis CD, Teymen A, Karahan O, Zcan FO, Bilim C, Zdemir MO. *The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete*. Cement and Concrete Composites, 2008; V 30, pp:290–296.

- [52] Erntroy HC, Shacklock BW. *Design of high strength concrete mixes*. Proceeding of a symposium on mix design and quality control of concrete, Cement and Concrete Association, London, 1954; pp:55-73.
- [53] Neville AM. *Properties of Concrete*. Fourth and Final Edition, John Wiley and Sons, Inc, New-York, USA.1996; 844p.
- [54] Eguchi K, Teranishi K. *Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model*. Cement and Concrete Research, 2005; V 35, pp:483-493.
- [55] Guinea GV, El-Sayed K, Rocco CG, Elices M, Planas J. *The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete*. Cement and Concrete Research, 2002; V 32, pp:1961-1970.
- [56] Makani A. *Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2011; 298p.
- [57] Schumann W. *Guide des Pierres et Minéraux*. Édition :Delachaux et Niestlé SA, Paris, 1989 ; 381p.
- [58] Chandra S, Berntsson L. *Light weight Aggregate concrete*. Noyes Publications, 2002; 406p.
- [59] Kaplan MF. *Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates*. ACI Journal Proceedings, 1959; V 55, pp:1193-1202.
- [60] Meziane EH, Ezziane K, Kenai S, et al. *Mechanical, hydration, and durability modifications provided to mortar made with crushed sand and blended cements*. Journal of Adhesion Science and Technology.2015; V 29, pp:1987–2005.
- [61] Olorunsogo FT, Padayachee N. *Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes*, Cement and Concrete Research, 2002; V 32, pp:179-185.
- [62] Ledesma EF, Jiménez JR, Fernández JM, Galvín AP, Agrela F, Barbudo A. *Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete Aggregates*. Construction and Building Materials, 2014; V 71, pp:289–298.
- [63] Bilan des activités minières. *Direction générale des mines, Ministère des l'énergie des Mines*. 2010 ; 104p.
- [64] NFP15-301, *Ciment courant : Composition, spécification, et critère de conformité*, AFNOR, Paris, 1994 ; 25p.
- [65] Chloup-Bondant M. *Etude des mécanismes réactionnels dans l'hydratation des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire*. Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy I, 1996; 156p.
- [66] Zhu W, Gibbs JC. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement and concrete research, 2005; V 35, pp: 1457-1462.
- [67] Estellé P, Lanos C, Perrot A. *Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2008; V 154, pp:31-38.

- [68] Bonavetti VL, Rahhal V, Viviana F, Irassar EF. *Studies on the carboaluminate formation in limestone filler blended cements*. Cement and Concrete Research, 2001; V 31, pp: 853-859.
- [69] Chi C, Wu Y, Riefler C. *The use of crushed dust production of self consolidating concrete (SCC), Recycling Concrete and other materials for sustainable development*.ACI, 2004; V 219, pp: 115-130.
- [70] Kenai S, Benna Y, Menadi B. *The effect of fines in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete*. Proceedings of the International Conference on Infrastructure regeneration and rehabilitation, Sheffield. 1999; pp:253-261.
- [71] Bonavetti VL, Irassar EF. *The effect of stone dust content in sand*. Cement and Concrete Composites, 1994; V 24, pp: 580-590.
- [72] Benabed B, Kadri EH, Azzouz L, Kenai S. *Properties of self-compacting mortar made with various types of sand*, Cement and Concrete Composites, 2012; V 34, pp:1167–1173.
- [73] Ramirez JL, Barcena JM, Urreta JI. *Proposal for limitation and control of fines in calcareous sands based upon their influences in some concrete properties*, Materials and Structures, 1990; V 23, pp:277-288.
- [74] Donza H, Gonzalez M, Cabrera O. *Influence of fine aggregate mineralogy on mechanical properties in high strength concrete*. Second international conference on high performance concrete, Gramado (Brazil), 1999; pp:4-6.
- [75] Tsvilis S, Chaniotakis E, Kakali G, Batis G. *An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete*. Cement and Concrete Composites, 2002; V 24, pp: 371-378.
- [76] Esping O. *Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 2008; V 38, pp:938-944.
- [77] Ye G, Liu X, De Schutter G, Poppe AM, Taerwe L. *Influence of Limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*. Cement and Concrete Composites, 2007; V 29, pp:94-102.
- [78] Nanthagopalan P, Santhanam M, *Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 2009; V 23, pp:3443-3449.
- [79] Neto SN, Campitelli VC. *The influence of limestone additions on the rheological properties and water retention value of portland cement slurries*. ASTM Special Technical Publication, 1990; V 1064, pp: 24-29.
- [80] Cyr M, Mouret M. *Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: Consequences on self -Compacting Concrete design*. Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, 2003; pp: 241-255.
- [81] Gallias JL, Kara-Ali R, Bigas JP. *The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes*. Cement and concrete research, 2000; V 30, pp:1543-1549.

- [82] Brookbanks P. *Properties of fresh concrete, Performance of Limestone Filled Cements*. Proceedings of a seminar of the BRE/BCA, Garston, 1989; 15p.
- [83] Yahia A, Tanimura M, Shimabukuro A, Shimoyama H. *Effect of limestone powder on rheological behavior of highly flowable mortar*, Proceedings of the Japan Concrete Institute, 1999; V 21, pp:559-564.
- [84] Yahia A, Tanimura M, Shimabukuro A, Shimoyama H, Tochigi T. *Effect of mineral admixtures on rheological properties of equivalent self-compacting concrete mortar*. Proceedings of the 7th East Asia- Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction, Kochi, Japan, August 1999; pp:1330-1335.
- [85] Westerholm M, Lagerblad B, Silfwerbrand J, Forsberg E. *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*. Cement and Concrete Composites, 2008; V 30, pp:274-282.
- [86] Nehdi M, Mindess S, Aitcin PC. *Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles*, Cement and Concrete Research, 1998; V 28, pp:687-697.
- [87] Yahia A, Tanimura M, Shimoyama Y. *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*. Cement and Concrete Research, 2005; V 35, pp:532-539.
- [88] Zhang X, Han J. *The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste*. Cement and concrete research, 2000; V 30, pp:827-830.
- [89] Petit JY, Wirquin E. *Effect of limestone filler content and superplasticizer dosage on rheological parameters of highly flowable mortar under light pressure conditions*. Cement and Concrete Research, 2010; V 40, pp:235-241.
- [90] Yamani N, El Azdi K, Zaim K. *Utilisation de sable de mer et de concassage dans le mortier de ciment*. Revue Marocaine du genie civil, N° 2, Maroc, 1992; pp:43-63.
- [91] Bederina M, Makhloufi Z, Bouziani T. *Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete*. Physics Procedia, 2011; V 21, pp:28-34.
- [92] Sadhouari F, Goufi N, Guezzouli A. *Valorisation de l'utilisation des sable concasses par analyse des propriétés des mortiers et bétons*. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 2009; pp:1-8.
- [93] Bui VK, Montgomery D. *Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume*. Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Stockholm, 1999; pp:373-384.
- [94] Persson B. *A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete*. Cement and Concrete Research, 2001; V 31, pp:193-198.
- [95] Zhu W, Bartos PJM. *Permeation properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 2003; V 33, pp:921-926.
- [96] Joudi I, Lecomte A, Ben-Ouezdou M. *Influence des sables de concassage à différents taux de filler sur les performances mécaniques des bétons*. Séminaire International, Innovation et Valorisation En Génie Civil et Matériaux De

- Construction, Rabat, Maroc , Novembre 2011; pp1-7.
- [97] Alshahwany RBA. *Effect of Partial Replacement of Sand with Limestone Filler on Some Properties of Normal Concrete*. Al-Rafidain Engineering Journal, 2011; V19, pp:37-48.
- [98] Benachour Y. *Analyse de l'influence de l'ajout de taux élève de fillers calcaire sur les propriétés physique, mécaniques, microstructurales, de transfert et de durabilité des mortiers*. Thèse de doctorat, sous la direction de Pr. Houari H, Département de Génie Civil, Université de Mentouri constantine, 2009; 148p.
- [99] Ramirez JL., Barcena JM, Urreta JI. *Sables calcaires à fines calcaires et argileuses: influence et nocivité dans les mortiers de ciment*. Matériaux et Construction 1987; V 20, pp:202-213.
- [100] Ramachandran VS, Zhang CM. *Cement with calcium carbonate additions, 8th International Congress on the Chemistry of Cement*. Rio, Brazil, September 1986; pp:178-182
- [101] Kenai S, Menadi B, Attar A, Khatib J. *Effect of crushed limestone fines on strength of mortar and durability of concrete*. Proceedings International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT), Kuala Lumpur, Malaysia, 2008; pp:205-216.
- [102] Menadi B, Kenai S, Khatib J, Aitmokhtar K. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Construction and Building Materials*, 2009; V 23, pp:625-633.
- [103] Tsvillis S, Batis G, Chaniotakis E, Grigoriadis G, Theodossis D. *Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar*. Cement and Concrete Research, 2000; V 30, pp:1679-1683.
- [104] Ferkous S, Houari H, Bensebti SE, Guemmadi Z. *Mecanique Des Bétons Sous Conditions Locales : Paramètres De Composition*. Revue Sciences et Technologies B, N°24, 2005; pp:75-84.
- [105] Mahzuz HMA, Ahmed AAM, Yusuf M. A. *Use of stone powder in concrete and mortar as an alternative of sand*. African Journal of Environmental Science and Technology, 2011; V 5, pp:381-388.
- [106] Sivakumar A, Prakash M. *Characteristic studies on the mechanical properties of quarry dust addition in conventional concrete*. Journal of Civil Engineering and Construction Technology, 2011; V 2, pp:218-235.
- [107] Venkatarama BV. *Suitability of manufactured sand (M-Sand) as fine aggregate in mortars and concretes*. Department of Civil Engineering Indian Institute of Science Bangalore, January 2012; pp:1-16.
- [108] Wakchaure MR, Shaikh AP, Gite BE. *Effect of Types of Fine Aggregate on Mechanical Properties of Cement Concrete*. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 2012; V 2, pp:3723-3726.
- [109] Saeed A, Shahid M. *Effects of crushed and natural sand on the properties of fresh and hardend concrete*. 33rd Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, August 2008; pp:109-114.

- [110] Balapgol B, Kulkarni SA, Bajoria KM. *Strength and durability of concrete with crushed sand*, Indian institute of Technology, 27th Conference on Our World in Concrete and Structures , Singapore, August 2002; pp:179-184.
- [111] Shaikh MG, Daimi SA. *Durability studies of concrete made by using artificial sand with dust and natural sand*. International Journal of Earth Sciences and Engineering 2011; V 04, pp:823-825.
- [112] Sachin BK, Amol JM, Vijayshree AA. *Strength of concrete containing different types of fine aggregate*. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2012; V 3, pp:1-3.
- [113] Makhloufi Z, Bouhicha M. *Caractérisation et comportement mécanique du béton calcaire superplastifié et non superplastifié du turonien de l'atlas saharien (étude comparative)*. 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 2009.
- [114] Ravina D. *Slump loss of fly ash concrete*. Concrete International; 1984; V6,pp:35-39.
- [115] Kim JK, Lee CS, Park CK. *The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete*. Cement and concrete Research, 1997; V 27, pp:1719-1729.
- [116] Rmili A, Ben Ouezou M. *Incorporation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants*. Séminaire International, Innovation et Valorisation En Genie Civil et Matériaux De Construction, Rabat, Maroc, Novembre 2011; pp:1-6.
- [117] Ltifi M, Benjamaa N, Belhadj AN, Akrouit K. *Etude comparative des bétons hydrauliques à base de sable siliceux et sable calcaire de concassage*. Colloque CMEDIMAT , Décembre 2005; pp:1-9.
- [118] Lohani T.K, Padhi M, Dash K.P, Jena S, Optimum utilization of Quarry dust as partial replacement of sand in concrete, Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, 2012; V 1, pp:391-404.
- [119] Donza H, Cabrera O. *The influence of kinds of fine aggregate on mechanical properties of high strength concrete*. Proceedings of 4th International Symposium of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, France, 1996; V 2, pp:153–160.
- [120] Akrouit K, Mounanga P, Ltifi M, Benjamaa N. *Rheological, Mechanical and structural performances of crushed limestone sand concrete*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2010; V 4, pp:97-104.
- [121] Vinayak RS, Popat DK. *Properties of Concrete by Replacement of Natural Sand with Artificial Sand*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2012; V 1, pp:1–7.
- [122] Rmili A, Ben Ouezdou M, Added M, Ghorbel E. *Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part II: SCC Fresh and Hardened States Characteristics*. Construction and Building Materials, 2009; V 3, pp: 11-14.
- [123] Bouziani T. *Assessment of fresh properties and compressive strength of self compacting concrete made with different sand types by mixture design modeling approach*. Construction and Building Materials, 2013; V 49, pp: 308-314.

- [124] Chow RKK, Yip SWS, Kwan AKH. *Processing crushed rock fine to produce manufactured sand for improving overall performance of concrete*. HKIE Transactions, 2013; V 20, pp:240-249.
- [125] Sangjoon Park. *study on the fluidity and strength properties of high performance concrete utilizing crushed sand*, International Journal of Concrete Structures and Materials , 2012; V 6, pp:231–237.
- [126] Tahar Z, Kadri EH, Ngo TT, Bouvet A, Kaci A. *Influence of recycled sand and gravel on the rheological and mechanical characteristic of concrete*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016; V 30, pp:392-411.
- [127] Priyanka AJ, Dilip KK. *Effect of replacement of natural sand by manufactured sand on the properties of cement mortar*. International Journal Of Civil And Structural Engineering, 2013; V 3, pp:621-628.
- [128] Adams JM, Rajesh AM, Brightson P, Anand MP. *Experimental Investigation on The Effect Of M-Sand In High Performance Concrete*, American Journal of Engineering Research (AJER), 2013; V 02, pp:46-51.
- [129] Shanmugapriya T, Uma RN, *Optimization of partial replacement of M-sand by natural sand in high performance concrete with silica fume*. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, 2012; V 2, pp:73-80.
- [130] Elbahi B, Boukli Hacene SMA. *Influence of limestone fillers and natural pozzolan on engineering properties of concrete*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016; V 30, pp:1795-1807.
- [131] Nagabhushana, Sharada-bai H. *Use of crushed rock powder as replacement of fine aggregate in mortar and concrete*, Indian Journal of Science and Technology, 2011; V 4, pp:917-922.
- [132] Priyanka AJ, Dilip KK. *An experimental investigation on the properties of concrete containing manufactured sand*. International Journal of Advanced Engineering Technology, 2012; V 3, pp:101-104.
- [133] Omar MO, Ghada DAE, Mohamed AS, Hassan AM. *Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties*. Housing and Building National Research Center Journal, 2012; V 8, pp:193–203.
- [134] Bhikshma V, Kishore R, Raju NHM. *Flexural behavior of high strength stone dust concrete*, Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction – Ghafoori (edition.) Taylor & Francis Group, London, 2010; pp:491-494.
- [135] Anitha-selva SSD, Gayathri R, Swathi G, Prince AG. *Experimental Investigation On Quarry Dust Concrete With Chemical Admixture*, International Journal of Latest Research in Science and Technology, 2013; V 2, pp:91–94.
- [136] Bederina M, Makhloufi Z, Bounoua A, Bouziani T, Queneudec M. *Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions*. Construction and Building Materials, 2013; V 47, pp:146–158.
- [137] XP P 18-303. Normalisation française: *Eau de gâchage pour béton*, Août 1999 : 16p.

- [138] NF EN 196-1. *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques*. Avril 2006.
- [139] ASTM C230/C230M-08, Standard specifications for flow table for use in tests of hydraulic cement, ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, 2008; V 04, pp:1-6.
- [140] Hamza S, Kadri EH, Ngo TT, Bouvet A, Cussigh F, Kenai S. *A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation*. Applied Rheology, 2014; V 24, pp:1-7.
- [141] Adjoudj M, Ezziane K, Kadri EH, Ngo TT, Kaci A. *Evaluation of rheological parameters of mortar containing various of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer*. Construction and Building Materials, 2014; V 70, pp:549-559.
- [142] Zhu W, Gibbs JC. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, 2005; V 35, pp:1457-1462.
- [143] Butler L, West JS, Tighe SL. *The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement*. Cement and Concrete Research, 2011; V 41, pp:1037–1049.
- [144] Cortes DD, Kim HK, Palomino AM, Santamarina JC. *Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands*. Cement and Concrete Research, 2008; V 38, pp:1142–1147.
- [145] Kou SC, Poon CS. *Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates*. Cement & Concrete Composites, 2009; V 31, pp:622–627.
- [146] Burgos-MO, Alonso MM, Puertas F. *Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers*. Construction and Building Materials, 2013; V 48, pp:417–423.
- [147] Westerholm M, Lagerblad B, Silfwerbrand J, Forssberg E. *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*. Cement & Concrete Composites, 2008; V 30, pp:274–282.
- [148] Bager DH, Geiker MR, Jensen RM. *Rheology of self-compacting mortars–influence of particle grading*. Nordic concrete research, 2001; V 26, pp:1-16.
- [149] Fujiwara H, Nagataki S, Otsuki N, Endo H. *Study on reducing unit powder content on high- fluidity concrete by controlling powder particle size distribution*. Transl. Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng. 1996; V 30, pp:117– 127.
- [150] Baron J, Olivier JP. *Les bétons: bases et données pour leurs formulations*. Eyrolles, France, 1997; 520p.
- [151] Chanvillard G, Basuyaux O. *Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 1996 ; N°205, pp:49-63.
- [152] Kelham S. *Portland limestone cements*. Concrete (London), may 1998; V 32, pp:1-30.



ملخص

في الجزائر، كثرة تشييد المباني وأعمال الهندسة المدنية أدت إلى زيادة كبيرة في استهلاك الرمال الطبيعية. الإفراط في استهلاك هذه الرمال تسبب في مشاكل اقتصادية وبيئية تحتم على البحث عن بديل. الرمال المسحوقة تاهل كبديل مناسب للرمال الطبيعية. هذا العمل يدرس تأثير الاستبدال الجزئي أو الكلي للرمال الطبيعية بالرمل المسحوقة في مزيج الخرسانة. لهذا قمنا بصناعة خليط الخرسانة من مختلف نسب الاستبدال؛ 0، 20، 40، 60، 80 و 100٪ مع ثلاث نسب مختلفة من الماء. تتكون الاختبارات في تحديد متطلبات الملدن لتكوين خرسانة في حالة بلاستيكية على أساس المحتوى من الرمال المسحوقة. يركز التقييم على القابلية، القوة الميكانيكية والخصائص الريولوجية. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الرمال المسحوقة لها تأثير كبير على خصائص الخرسانة، وجودها يزيد من القوة الميكانيكية، يقلل من الخصائص الريولوجية ويقلل من تركيز الملدن حتى مع انخفاض نسبة الماء. أيضا من أجل تشكيل خرسانة بنسبة قليلة من الماء فإنه من المفيد استخدام بدائل جزئية من سحق الرمال من اللجوء إلى استخدام جرعات مفرطة من الملدن.

Résumé

En Algérie, Le développement dans la construction des bâtiments et des ouvrages en génie civil a provoqué un accroissement considérable dans la consommation des sables naturels. Cette consommation excessive engendre des problèmes économiques et environnementaux ce qui a conduit à chercher des alternatives. Le sable de concassage se profile comme substitut approprié pour le sable naturel. Ce travail étudie les performances du sable concassage (CS), lorsqu'il remplace partiellement ou complètement le sable naturel (NS) dans le mélange du mortier. Pour cela, des mélanges de mortiers ont été confectionné à différents taux de remplacement ; 0, 20, 40, 60, 80 et 100%, avec trois rapports E/C. Les essais consistent à déterminer l'exigence en superplastifiant pour avoir une consistance plastique du mortier en fonction du contenu du sable de concassage. L'évaluation porte sur l'ouvrabilité, les résistances mécaniques et les propriétés rhéologiques. Les résultats obtenus montrent que le sable de concassage a un grand effet sur les propriétés de mortier. Sa présence augmente la résistance mécanique, diminue les paramètres rhéologiques et réduit le dosage en superplastifiant, même avec un faible rapport E/C. Ainsi pour confectionner un mortier avec de faibles rapports E/C, il est intéressant d'utiliser des remplacements partiels en sable de concassage que de recourir à l'utilisation de dosages excessifs en superplastifiant.

Abstract

In Algeria, the development in construction of buildings and civil engineering works caused a considerable increase in the consumption of natural sands. These excessive consumption cause economic and environmental problems which led to seek other alternatives. Crushed sand qualifies as a suitable substitute for natural sand. This work studies the performance of crushed sand (CS), when partially or completely replaced natural sand (NS) in the mix mortar. For this, we have constructed mixtures of different mortars with replacement rate of 0, 20, 40, 60, 80 and 100% and with three W/C ratios. The tests consist of determining the superplasticizer requirement to have a plastic consistency of mortar according to the CS content. The evaluation focuses on the workability, mechanical strength and rheological properties. The results obtained show that the crushed sand has a great effect on the mortar properties. Their presence increases the mechanical strength, decreases the rheological parameters and reduces the dosage of superplasticizer even with a low W / C. Thus, in order to make a mortar with low E / C ratios, it is advantageous to use partial replacements in crushed sand rather than using excessive quantities of superplasticizer.