REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème

EFFET DU COEFFICIENT D'ABSORPTION DU SABLE DE CONCASSAGE CALCAIRE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE ET L'OUVRABILITE DU MORTIER

Présenté par :

BAHRI Mustapha

Proposé et Dirigé par :

Dr. SAFIDDINE Salim

Promotion Juin 2019

Liste des figures

Figure I.1 :	Etat « SSD » déterminé par l'essai d'effondrement au cône (Pas assez précis pour les sables) (Selon [Gentilini, 2013], inspiré de : EN 1097-6)	**04**
Figure I.2 :	Présentation de l'affaissement des sables (en haut: SN et en bas: SC) en passant de l'état sec à l'état sursaturé par l'ajout d'eau. La forme initiale est conique de 15 cm de haut, dont les diamètres est de 10 cm et 5 cm [Naël-Redolfi, 2018].	**06**
Figure I.3 :	Evaluation visuelle de la forme des particules Basé sur des observations morphologiques [Krumbein, 1963]	**08**
Figure I.4 :	Influence de la forme des particules de sables sur la demande en eau, [Nichols, 1982]	**08**
Figure I.5 :	Comparaison des spécifications de granulométrie des sables	**11**
Figure I.6 :	Influence du type de sable et de la teneur en fines au rapport E/C [Ahmed, 1989]	**12**
Figure I.7 :	Effet de la teneur en fines dans le SC sur l'air occlus [Celik et Marar, 1996]	**13**
	Relation entre l'âge, le rapport E/C, la teneur en fines et la résistance à la compression [Celik et Marar, 1996]	
Figure I.8 :	Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours du béton en fonction de la teneur en fines dans le SC avec un rapport E/C constant et un	**13**
Figure I.9 :	affaissement constant [Ahmed et El-Kourd, 1989]	**14**
	Influence de type de sable sur la résistance à la compression à 28 jours du béton [Ahmed et El-Kourd, 1989]	
Figure I.10 :	L'évolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en fines [Malhotra, 1985]	**15**
Figure I.11 :	Evolution : a) des rapports E/C et E/Ceq b) de la densité c) de la porosité, en fonction de la teneur en fines dans le sable [Benachour, 2008].	**16**
Figure I.12 :	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression de divers mélanges de béton [Menadi, 2009].	**17**
Figure I.13 :	Effet de la teneur en DS sur a) le mini-slump et b) les mesures de la viscosité, des mortiers à base de sable binaire (CS / DS) [Benabed, 2014].	**18**

Figure I.14 : Variation a) du rapport E/C et b) de la résistance à la compression et à **20**
Figure I.15 : la flexion en fonction du taux de filler [Benachour, 2008] **21**
Figure II.1 : Les différentes catégories du sable **25**
Figure II.2 : Lavage du sable et récupération des fines par voie humide **27**
Figure II.3 : Malaxeur normalisé pour pâte et mortier **28**
Figure II.4 : Essai d'équivalent de sable **30**
Figure II.5 : Tamiseuse électrique **31**
Figure II.6 : Détermination du surface spécifique **32**
Figure II.7 : Détermination du coefficient d'absorption SC **34**
Figure II.8 : Détermination du coefficient d'absorption du SR **34**
Figure II.9 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B **35**
Figure II.10 : Essais sur la consistance du mortier (Maniabilimètre B) **36**
Figure II.11 : Développement de l'essai d'affaissement pour le mortier **37**
Figure II.12 : L'aéromètre à mortier **38**
Figure II.13 : Mesure de la masse volumique du mortier **38**
Figure II.14 : essais a l'état durci **39**
Figure II.15 : Essais de compression **40**
Figure II.16 : Essais de traction Tamiseuse électrique **40**
Figure III.1 : Les courbes granulométriques des sables **42**
Figure III.2 : teneur en fines dans le SC **44**
Figure III.3 : Perte d'affaissement du mortier en fonction du temps **45**
Figure III.4 : Perte de maniabilité du mortier en fonction du temps **46**
Figure III.5 : Effet du rapport E/C **47**
Figure III.6 : Effet du taux d'absorption sur l'état frais du mortier **48**
Figure III.7 : Comparison avec le SR **49**
Figure III.8 : Effet du taux d'absorption sur la résistance a la traction **50**
Figure III.9 : Effet du taux d'absorption sur la résistance a la compression **51**
Figure III.10 : Effet de la teneur en fines dans le SC sur la résistance mécanique **52**

Liste des Tableaux

Page

Tableau I.1	Valeurs supérieures spécifiées (Vss) précisées par la norme [Dreux, 1998].	**23**
Tableau II.1	Analyses chimiques du sable utilisé ……	**25**
Tableau II.2	Analyses chimiques du ciment…….	**26**
Tableau II.3	Composition minéralogique du clinker……	**26**
Tableau II.4	Propriétés physiques du ciment……	**26**
Tableau II.5	Résistance à la compression…….	**26**
Tableau II.6	Récapitulation des opérations de malaxage……..	**28**
Tableau II.7	Désignation des mortiers……..	**29**
Tableau II.8	Les essais de caractérisation sur mortier durci…….	**39**
Tableau III.1	Valeurs d'équivalent de sable……...	**41**
Tableau III.2	Analyse granulométrique des sables……	**42**
Tableau III.3	Coefficient d'absorption de sable de concassage…….	**43**

Notations et Symboles

Ab	**Absorption (%)**
d	**La plus petite dimension des grains (mm)**
D	**La plus grande dimension des grains (mm)**
Vss	**La valeur spécifiée supérieure (%)**
Vsi	**La valeur spécifiée inférieure (%)**
C	**Ciment**
E	**Eau**
L	**Liant**
F	**Fines**
S	**Sable**
SC	**Sable Concassé**
SR	**Sable roulé**
M	**Mortier**
M*f*	**Module de finesse**
V_{Eau}	**Volume d'eau**
V_{Fines}	**Volume des fines**
V_{Sable}	**Volume du sable**
M0SC0	**Mortier du sable de concassage a ٪5 des fines**
M0SC2	**Mortier du sable de concassage a ٪12 des fines**
M24SC2	**Mortier du sable de concassage a 12٪ des fines imbibe 24**
M0SC2*	**Mortier du sable de concassage a ٪12 des fines imbibe 1/2h**
Rt	**Résistance à la flexion en (MPa)**
Ff	**Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N)**
RC	**Résistance à la compression en (MPa)**
Fc	**Charge de rupture en (N)**

ملـخـص

يعد فقدان قابلية التشكل الخرساني مهمًا جدًا في ممارسة الإنشاءات وخاصة مع الخرسانة الجاهزة. هذه الظاهرة ناتجة عن تقليل ماء الخلط الناتج عن امتصاصه وتبخره وترطيبه للأسمنت.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم دقة الطريقة القياسية لتحديد معدل امتصاص الرمال عند تطبيقها على رمل التكسير (رت) . وبالتالي ، فإن تأثير معدل الامتصاص (يقاس بعد 30 '، 24 سا من تشرب) على نسبة الماء / الأسمنت الفعلية عن طريق قياس تطور الخواص الميكانيكية والريولوجية للملاط. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها ، من خلال استخدام رت الجافة والرطبة في الملاط ، أن رت لا تمتص جميع كمية المياه التي توفرها المعيار المعمول به. لهذا الغرض ، فإن كمية المياه التي لا تزال تضاف منطقيا إلى خلط المياه الحرة عن طريق زيادة نسبة الماء / الأسمنت

الكلمات الجوهرية: رمل المحاجر، الملاط ، نسبة الامتصاص، قابلية التشكل، المقاومة الميكانيكية.

Résumé

La perte d'ouvrabilité du béton est très importante dans la pratique de la construction et en particulier avec le béton prêt à l'emploi. Ce phénomène est dû à la réduction de l'eau de mélange provoquée par l'absorption, l'évaporation et l'hydratation du ciment.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la précision de la méthode standard concernant la détermination du taux d'absorption des sables lorsqu'elle est appliquée sur le sable de concassage (SC). Ainsi, l'effet du taux d'absorption (mesuré après 30' ; 24h d'imbibition) sur le rapport effectif E/C en mesurant l'évolution des propriétés mécaniques et rhéologiques du mortier. Les résultats obtenus, à travers l'utilisation du SC sec et humide dans le mortier, montrent que le SC n'absorbe pas toute la quantité d'eau prévue par la norme en vigueur. A cet effet, la quantité d'eau qui reste s'ajoute logiquement à l'eau libre de gâchage en augmentant le rapport E/C.

Mots clés : sable de concassage ; mortier ; taux d'absorption, ouvrabilité ; résistance mécanique.

Abstract

The loss of workability of concrete is very important in the practice of construction and especially with ready-mix concrete. This phenomenon is due to the reduction of the mixing water caused by the absorption, evaporation and hydration of the cement.

The main objective of this study is to evaluate the accuracy of the standard method for the determination of the sand absorption rate when applied to crushing sand (CS). Thus, the effect of the absorption rate (measured after 30 ', 24h of imbibitions) on the effective E/C ratio by measuring the evolution of the mechanical and rheological properties of the mortar. The results obtained, through the use of dry and wet CS in the mortar, show that the CS does not absorb all the quantity of water provided by the standard method. For this purpose, the amount of water that remains logically added to the free water mixing by increasing the ratio E / C.

Key words: crushing sand; mortar; absorption rate, workability; mechanical resistance.

INTRODUCTION GENERALE

Contexte de la recherche

Les spécifications de la fraction sableuse du béton ont été élaborées presque exclusivement sur la base de l'expérience acquise avec le sable naturel (SN) depuis de nombreuses années, car c'était pratiquement le seul type utilisé. Les SNs propres contiennent généralement des particules roulées qui permettent une bonne maniabilité de bétons sans ajout de quantités excessives d'eau ou de ciment. Lorsque des fines minérales (<80 µm) sont présentes dans le SN, les particules sont souvent des particules d'argile ou de limon pouvant être «nocives» dans le béton. Celles-ci ont une influence indésirable sur les besoins en eau, la maniabilité et les caractéristiques de résistance des mélanges de béton. Afin de contrôler la présence de telles fines dans les sables, des spécifications limitant la quantité de matériau moins de 80 µm ont été définies. Ci-après, les matériaux moins de 80 µm seront désignés par «fines». Les spécifications actuelles dans la plupart dans des pays le monde, limitent le pourcentage des fines autorisé dans les sables utilisés pour le béton. Ces spécifications ont été utilisées dans l'industrie du béton au cours de ce dernier siècle. Cependant, pendant la même période, l'approvisionnement dans la majorité de ces pays, y compris l'Algérie, en granulats s'est progressivement modifié.

Comme les gisements de SNs se sont lentement épuisés, il est devenu nécessaire de produire de sable à partir des gisements de concassage. En effet, le sable de concassage (SC) est traité à partir des pierres de carrière qui sont concassées et classées de manière à obtenir une distribution granulométrique contrôlée et des formes de particules varient entre cubique et angulaire. La première utilisation commerciale de SC a été faite au début des années 1930. L'utilisation actuelle de SC est 100 fois supérieure à celle des années 1930 et représente environ 20% des besoins totaux en sables de béton. Ce pourcentage devrait augmenter dans les années à venir [ICAR, 2001]. Ce qui permet au SC d'être parmi les sujets d'actualité pendant les dernières années. Par conséquent, on compte plusieurs articles publiés en 2018 et le premier trimestre de 2019 dans des journaux réputés à l'échelle mondiale comme il est indiqué dans les références bibliographiques.

Le SC se distingue des SNs par la gradation, la forme et la texture des particules. Chacune de ces caractéristiques influe sur les performances du béton et sur les exigences du ciment, de l'eau, des additifs, de l'ouvrabilité et des caractéristiques de mise en place [McKeagney, 1984].

Problématique

Dans les environnements chauds et secs, notamment à l'été et surtout dans la région saharienne, les agrégats sont souvent à l'état sec. L'augmentation du taux de perte d'affaissement

et la tendance correspondante à ajouter de l'eau sur le chantier sont considérées comme l'un des problèmes potentiels du béton frais par temps chaud. En revanche, du fait de l'utilisation accrue des granulats concassés et recyclés, l'absorption d'eau moyenne des particules chimiquement inertes utilisées dans la composition des mélanges à base de ciment augmente progressivement. Toutefois, ces granulats montrent une plus grande tendance à absorber l'eau des mélanges frais tout au long des phases de malaxage, de transport et de mise en place. Il est donc devenu courant, lors du malaxage, de compenser cette eau à potentiellement absorber. Cette compensation repose à la fois sur une mesure de la teneur en eau initiale de ces granulats et sur une évaluation préalable de leur capacité d'absorption totale d'eau. Cette dernière évaluation est généralement réalisée à l'aide de la méthode de mesure de l'absorption d'eau standard [EN 1097-6 ou ASTM C 128-01] établie pour les agrégats naturels roulés, qui ont dominé la conception du mélange de béton au cours du XXe siècle.

Objectifs de recherche

Dans cette étude, nous cherchons à évaluer la précision et les limites de la méthode standard utilisée pour déterminer le taux d'absorption des granulats (graviers et sables) lorsqu'elle est appliquée sur les SCs. Bien que cette méthode puisse facilement être appliquée à des granulats grossiers, quelles que soient leur origine et/ou leur forme, elle semble générer des difficultés et devenir fortement dépendante de l'opérateur pour les sables notamment concassés ou recyclés, ainsi que pour tout type de particules poreuses de sable non roulé.

Nous allons étudier spécifiquement les effets inattendus de l'angularité des grains de SC. Autrement dit, l'objectif principal de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de l'absorption du sable calcaire de concassage local sur le rapport eau/ciment (E/C) effectif, la résistance et la perte d'affaissement du mortier de ciment.

I.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les caractéristiques et les effets des sables concassés sur les propriétés du béton. De nombreuses études ont récemment été menées sur les sables fabriqués dans le béton de ciment Portland. Les sujets de leurs recherches comprenaient les caractéristiques de base du SC, son effet sur les propriétés du béton frais et son effet sur les propriétés du béton durci.

I.2 Définitions

I.2.1 Sable de concassage

Les sables de concassage (SCs) sont des granulats concassés par un processus contrôlé. Ils sont produits à partir de pierres de carrière par broyage, puis ils sont classés pour obtenir un produit de granulométrie contrôlée. En raison des variations du type de roche et du processus de concassage, les caractéristiques physiques du SC, telles que la gradation, la forme, la teneur en poussière de concassage et la texture, peuvent varier de manière significative, ce qui influe sur les performances du béton.

I.2.2 Fines (Poussière) de concassage

Selon la norme NF P 18-540, le vocabulaire de « fines » désigne l'ensemble des grains passant au tamis de 80 μm, alors que dans la les précédentes normes, la teneur en fines était définie par le passant à 63 μm. Par contre, aux Etats-Unis, la norme ASTM ce sont les passants à 75 μm. Cependant, les fines de concassage (appelées souvent poussière) sont produites par la fracturation volontaire de la roche pour la production des granulats. Lorsque la forme du SC devient plus sphérique, les coins des agrégats sont éliminés, ce qui crée la poussière, qui passe généralement au tamis (75 ou selon la norme adoptée). La teneur en fines dans le SC due au processus de broyage devrait dépasser 10% sans avoir d'effet néfaste sur la plupart des bétons [Hudson, 1997]. En l'absence de matériaux nocifs tels que l'argile, le schiste, le charbon, le lignite ou d'autres impuretés, les fines doivent être considérées comme propres et acceptables pour une utilisation dans le béton [NCSA, 1976].

I.3 Caractéristiques de sables de concassage

Les granulats (sable et gravier) occupent généralement entre 70 et 80% du volume de bétons et ont une influence importante sur ses propriétés fraîches et durcies. En effet,

la caractérisation des sables pour le béton est de plus en plus importante en raison des nouvelles exigences de performance issues aux nouvelles techniques de mise en place (pompage, injection…).

I.3.1 Etat saturé à surface sèche « SSD »

Avant d'entamer cette partie, il est utile de définir l'état saturé à surface sèche (noté « SSD » vienne d'appellation en anglais : Saturated surface dry). SSD est défini comme l'état d'un agrégat dans laquelle les surfaces des particules sont "sèches" (c'est-à-dire que l'adsorption en surface n'aurait plus lieu), mais que les grains des granulats sont saturés. Dans cette condition, les granulats n'affecteront pas la teneur en eau libre d'un matériau composite (Figure I.1).

Le coefficient d'absorption d'eau (Ab) est définie en fonction de la masse de l'échantillon saturé à surface sèche (M_{ssd}) et de la masse de l'échantillon d'essai séché à l'étuve (M_{sec}) par :

$Ab = (M_{ssd}-M_{sec})/M_{sec}$

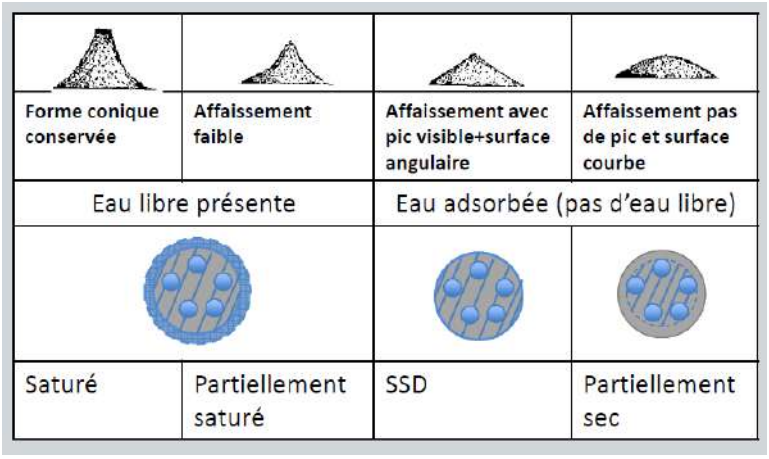


Figure I.1 : Etat « SSD » déterminé par l'essai d'effondrement au cône (Pas assez précis pour les sables) (Selon [Gentilini, 2013], inspiré de : EN 1097-6)

I.3.2 Taux d'absorption

La perte de maniabilité du béton avec le temps, souvent appelée perte d'affaissement, est très importante dans la pratique de la construction, en particulier avec le béton prêt à l'emploi où les temps de transport longs et les retards sur chantier sont courants. Ce phénomène est du aux effets de l'hydratation du ciment, de l'évaporation et du taux d'absorption d'eau dans le cas des granulats secs. Il est rapporté par Tattersall [1991] et Alhozaimy [2009] que ce dernier dépend principalement des caractéristiques du ciment, de sa teneur, du rapport E/C, de la température ambiante et celle du béton, de

l'affaissement initial et de la présence d'adjuvant.

La plupart des granulats naturels (sables et graviers) ont des capacités d'absorption comprises entre 1 et 2% en poids des agrégats [Mindess, 2003]. Par contre, le taux d'absorption pour les SCs peut atteindre ou dépasse 5%, notamment ceux d'origine calcaire. Cependant, l'absorption d'eau des granulats calcaire est élevée lors du premier mouillage des granulats, mais diminue rapidement avec le temps [PCA, 1975]. Il est naturel d'avoir une perte d'affaissement plus important lorsqu'on utilise des granulats secs qu'humides. En fait, l'utilisation de granulats à l'état sec est courante dans les régions désertes et en période canicule. Le guide de la construction en béton armé dans la péninsule arabique [CIRIA, 2002] indique que les granulats secs peuvent absorber de 10 à 20% de l'eau totale ajoutée, ce qui réduit considérablement l'ouvrabilité pendant le malaxage et jusqu'à la mise en place. La littérature relative à l'influence de l'absorption des granulats sur l'affaissement du béton est limitée [Alhozaimy, 2009]. Neville [1995] affirme que l'absorption d'eau par les granulats secs entraîne une perte de maniabilité avec le temps, mais qu'au-delà de 15 minutes environ, la perte devient faible. Il a attribué ce phénomène au fait que les agrégats secs se recouvraient rapidement de pâte de ciment, en particulier dans les mélanges riches, empêchant ainsi toute nouvelle entrée d'eau nécessaire à la saturation. En conséquence, il a recommandé d'ajouter une quantité réduite d'eau à absorber dans les 10 à 30 minutes initiales au lieu de la quantité totale d'eau basée sur une période d'absorption de 24 heures.

Shetty [1982] s'est également opposé à l'utilisation de l'absorption sur 24 h en faisant valoir que la quantité d'absorption d'agrégats devrait être basée sur un intervalle de temps égal au temps de fin de prise du ciment. La norme ASTM C 192 indique que la quantité d'eau absorbée par les agrégats avant la mise en place du béton correspond à 80% de la différence entre l'absorption pendant 24 h, déterminée par les méthodes d'essai C 128, et la teneur en eau dans les pores des agrégats à l'état sec, déterminée par la méthode d'essai C 566. Cependant, selon [ASTM C192] cette norme est limitée au cas des granulats à faible absorption (< 1,0%).

Il est à rappeler que selon la méthode standard ASTM C128 ou EN 1097-6, relative à la détermination du taux d'absorption des sables, l'échantillon est immergé dans de l'eau pendant 24 heures, puis séché progressivement pour atteindre l'état SSD. En effet, pour les particules centimétriques grossières avec surface spécifique relativement basse, le changement de couleur de la surface est un bon indicateur de l'état d'humidité de la

surface de la particule. Toutefois, pour les particules plus fines, cet indicateur devient insuffisant pour permettre une évaluation fiable de l'état SSD. Pour les sables, il est donc soutenu par une mesure d'affaissement (voir Figure 1). Les échantillons de particules naturelles roulées sèches devraient atteindre une forme conique avec une pente de cône comprise entre 15 et 30°. Cependant, dès que de l'eau en excès est ajoutée à un sable saturé en surface, des ménisques capillaires apparaissent entre les grains de sable. Ils diminuent l'affaissement de l'échantillon et augmentent la pente du dépôt de sable (voir Figure I.1). Ce changement de comportement est évident et permet à l'opérateur de mesurer avec précision la quantité d'eau nécessaire pour saturer les grains. Cependant, dans le cas de particules concassées, l'affaissement de l'échantillon séché est assez faible. La rugosité des particules, leurs formes irrégulières et les contacts de frottement directs associés entre particules augmentent tous la capacité du dépôt de sable à résister aux forces cisaillement dues à la gravité. Ainsi, l'angle de la forme conique obtenue par des échantillons secs peut atteindre des valeurs supérieures à 45°. La formation de ménisques d'eau entre les grains de sable n'affecte guère cette forme d'équilibre (voir Figure I.2) et la forme de l'échantillon reste la même sur une large gamme de quantités d'eau ajoutées. L'évaluation de l'état SSD est donc laissée à l'opérateur, ce qui diminue la fiabilité et la reproductibilité de la mesure [Naël-Redolfi, 2018].

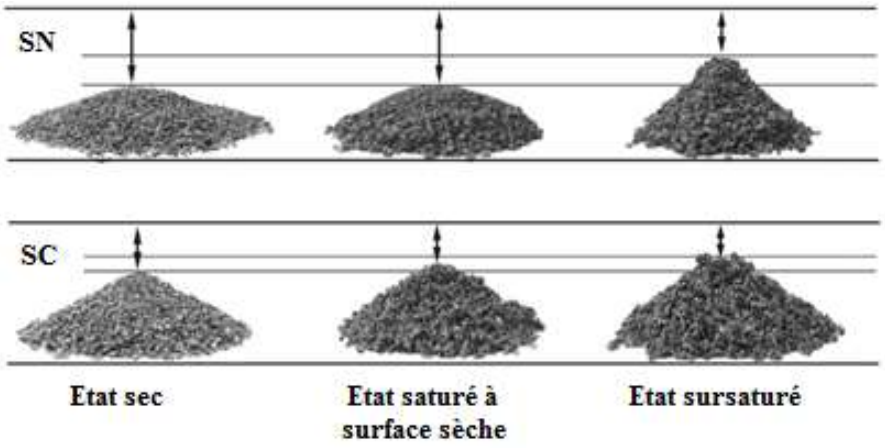


Figure I.2 : Présentation de l'affaissement des sables (en haut : SN et en bas : SC) en passant de l'état sec à l'état sursaturé par l'ajout d'eau. La forme initiale est conique de 15 cm de haut, dont les diamètres est de 10 cm et 5 cm [Naël-Redolfi, 2018].

De manière générale, selon la littérature on peut distinguer deux méthodes pour déterminer le coefficient d'absorption : dans la première méthode on part d'un matériau saturé qu'on sèche « EN 1097-6 (2001) ; ASTM C 128-07a (2007) ; AASHTO T 84 (2010) ; Hughes et Famili (1971) ; Krugler et al (1992) ; Kandhal et al. (1999) ; Mechling et al. (2003) ; Rogers et Dziedziejko (2007) » et dans la second méthode on part d'un

matériau sec qu'on sature « Tam et al. (2008) ; Tegguer (2012) ».

I.3.3 Forme des particules

Pour les SNs, les caractéristiques de la forme des particules ne sont pas généralement déterminées. Par contre, plusieurs travaux de recherche ont été consacrés pour étudier l'effet de la forme des particules du SC sur les performances du béton. La forme des grains du SC est influencée par les propriétés physiques de la roche mère et par la méthode de production [McKeagney, 1984]. La maniabilité, l'écoulement, le seuil de cisaillement, la viscosité, la teneur en air, les besoins en eau, le ressuage et la qualité de finition du béton sont tous influencés par la forme des particules des sables [NCSA, 1976]. Les SCs contiennent généralement plus de particules angulaires avec des textures de surface plus rugueuses et des faces plus plates que les SNs roulés qui sont plus roulés du fait de l'érosion au fil du temps.

Les chercheurs se sont intéressés à la quantification de la forme des particules afin d'expliquer les variations des besoins en eau de mélange et de la résistance à la compression pour des mélanges de proportions identiques. Dans les années 1960, Wills [Wills, 1967] a étudié les effets des sables et graviers sur la demande en eau dans le béton. Il a été constaté que sable avait un impact plus significatif sur la demande en eau que l'agrégat grossier. Ainsi, les résultats ont montré que le sable ayant une forme de particules plus feuilletée et allongée, provoque une diminution de la résistance à la compression. La figure I.3 fournit un graphique de comparaison pour l'évaluation visuelle de la forme des particules.

Nichols [1982] a rapporté que plus l'angularité des particules augmente, la teneur en vides augmentait et les rapports E/C est supérieurs par rapport à de mélanges comparables avec un sable moins anguleux. Comme le montre la figure I.4, la demande en eau du béton avec un affaissement donné augmente à mesure que l'indice de forme des particules augmente. La demande en eau augmente considérablement lorsque l'indice de forme est supérieur à 53 pour les deux teneurs en ciment. L'augmentation de la demande en eau au-dessus de l'indice de forme 53 est attribuée aux particules rugueuses dans l'ensemble qui nécessitent plus d'eau pour obtenir le même affaissement.

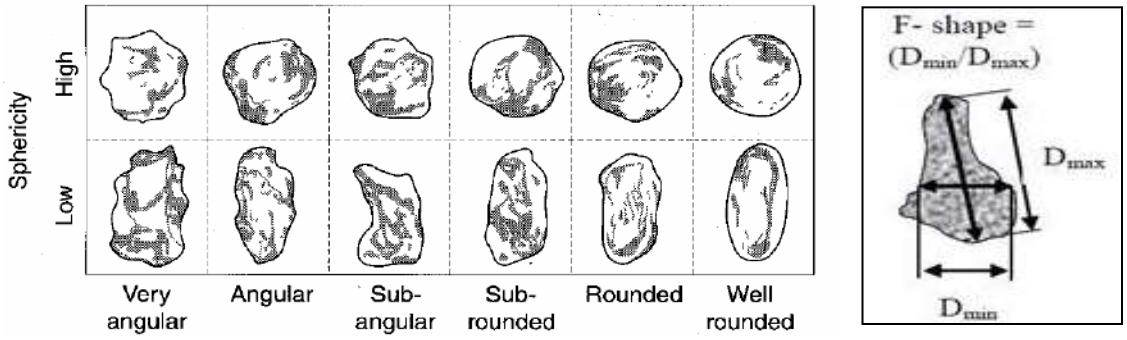


Figure I.3 : Évaluation visuelle de la forme des particules Basé sur des observations morphologiques [Krumbein, 1963]

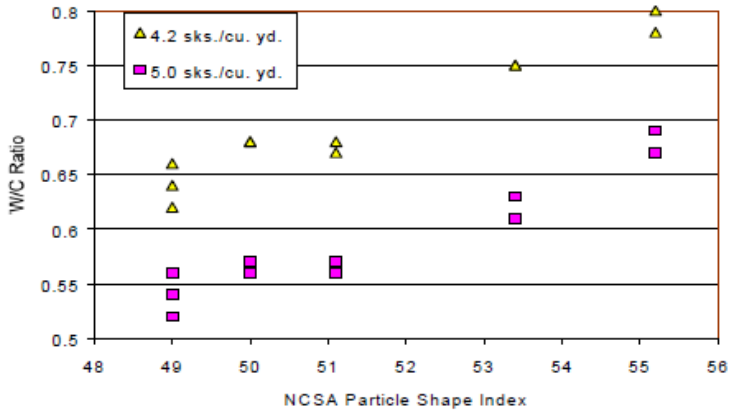


Figure I.4 : Influence de la forme des particules de sables sur la demande en eau, [Nichols, 1982]

I.3.4 Texture de la surface des particules

La texture de surface, appelée aussi rugosité de surface, est une propriété spécifique qui dépend de la texture, de la structure et du degré d'altération de la roche mère. La texture de la surface influe sur l'ouvrabilité, la quantité de ciment nécessaire pour produire des mélanges de mortier satisfaisants, ainsi que la liaison entre les particules et la pâte de ciment dans un mortier durci. Dans la plupart des cas, on obtient une certaine amélioration de l'adhérence lorsque la rugosité de la surface augmente. Il a été rapporté par [Mather, 1966] que la surface de contact des particules du sable avec la pâte de ciment diminue avec l'amélioration de l'état de surface des particules. Par conséquent, une particule hautement lisse aura moins de surface de liaison avec la matrice qu'une particule rugueuse du même volume. Cependant, une particule lisse nécessitera une couche de pâte plus fine pour lubrifier son mouvement par rapport aux autres particules d'agrégat. Il permettra donc une compacité plus serrée pour une ouvrabilité égale et nécessitera donc une teneur en pâte inférieure à celle d'une particule rugueuse de forme similaire.

Selon [ICAR], Rhoades et Mielenz [1946] ont expliqué l'interrelation complexe entre les principales caractéristiques texturales qui influent sur la qualité de la liaison de l'agrégat à la pâte de ciment : « Bien que la rugosité augmente la liaison avec la pâte de ciment, les aspects les plus importants de la texture de la surface sont la porosité, l'absorption et la perméabilité de la zone située immédiatement sous la surface. La pénétration de l'agrégat par la pâte de ciment favorise une bonne adhérence, mais la porosité impliquée par une très grande pénétrabilité peut impliquer une faible résistance à la traction et au cisaillement de l'agrégat, entraînant une perte de résistance du béton ». D'autres chercheurs ont écrit que les sables à très faible absorption développent généralement des liaisons moins résistantes et produisent des mortiers moins durables que ceux à absorption légèrement supérieure. L'interrelation entre l'adhérence et l'absorption peut expliquer en partie la faible corrélation entre la durabilité du béton et l'absorption, car la résistance de l'adhérence augmente à mesure que l'absorption augmente, tandis que la durabilité du béton tend à diminuer lorsque l'absorption augmente. Ainsi, les caractéristiques d'absorption seules des agrégats ne peuvent pas être considérées comme une indication fiable des caractéristiques de liaison, car les capillaires de très petite taille peuvent ne pas permettre la pénétration de la boue dans les agrégats mais peuvent permettre une pénétration considérable de l'eau. Du point de vue de la durabilité et de la liaison, les vides pénétrables de très petite taille sont les moins souhaitables [Dolar-Mantuani, 1983]. La force et la permanence du lien entre le ciment et l'agrégat sont fonction non seulement de la texture de la surface, mais également des caractéristiques chimiques de l'agrégat. L'intégrité de la liaison sera perdue si des réactions chimiques, telles que celle entre le ciment fortement alcalin et les agrégats réactifs, se produisent par la suite. D'autre part, certains types d'interactions chimiques superficielles entre l'agrégat et la pâte de ciment peuvent être bénéfiques pour réaliser une union plus intime et plus forte. Cependant, il n'existe actuellement aucune méthode d'essai efficace pour évaluer efficacement la texture du SC.

I.3.5 Granulométrie

L'importance de la granulométrie réside dans le fait qu'elle influence directement de nombreuses propriétés importantes du béton frais, telles que la consistance et la ségrégation, et dans une certaine mesure, les propriétés du béton durci [Baker, 1973]. En règle générale, dans les limites autorisées, la granulométrie des sables a une influence plus grande sur les propriétés du béton que celle des graviers [Hewlett, 1998]. À une

extrémité de la plage autorisée, un sable exceptionnellement grossier a tendance à produire un mélange ferme de maniabilité réduite et de risque plus élevé de ressuage, de ségrégation lors du mélange et de la mise en place du béton. D'autre part, un sable exceptionnellement fin peut augmenter considérablement la demande en eau d'un mélange de béton, en raison de sa surface de particules beaucoup plus grande, mais il peut améliorer la cohésion.

Dans une étude réalisée par la British Standards Institution, Pike [1989] concluait que : « Une teneur contrôlée en fines minérales autre que les minéraux argileux peut être tolérable et parfois utile, mais il convient d'éviter l'argile, comme les smectites qui sont particulièrement nocifs et leur contenu doit être sévèrement limité ». Pike a suggéré que les limites de fines puissent éventuellement être modérées si l'essai d'absorption au bleu de méthylène est disponible pour les fines d'argile nocives. Ramirez et al. [1990] ont proposé de la même manière des contrôles pour les sables calcaires fondés à la fois sur la teneur en fines et sur l'absorption de bleu de méthylène. Cependant, les effets de résistance sur les performances de résistance pour une valeur de bleu de méthylène particulière dépendent du type d'argile, et le test n'est donc pas définitif [Pike, 1992].

Marek [1995] a étudié l'effet de la forme et de la granulométrie des sables sur les propriétés du béton. Il a déclaré qu'une classification des sables spécifiée par la Portland Cement Association (PCA) convient aux particules relativement sphériques mais ne convient pas à la classification contenant des particules hautement non sphériques. Les résultats des tests ont indiqué que l'utilisation de micro-fines réduit le vide de l'agrégat, lubrifiant ainsi le système d'agrégats sans augmenter les besoins en eau du mélange. Il a recommandé de prendre en compte une teneur en fines supérieure à 5%, voire supérieure à 10%, lorsque les fines sont des poussières de fracture sans argile ni limon.

La norme ASTM C33 comprend des spécifications de sables pour le béton et constitue la base de nombreuses spécifications actuellement utilisées. Clelland [1980], de New Zealand Standards Bulletin, a souligné que certains sables conformes aux spécifications des sables ne permettent pas de réaliser un bon béton en raison de mauvaises caractéristiques physiques. Dans le même temps, les sables qui ne rentrent pas dans l'enveloppe de nivellement ont été utilisés avec succès dans le béton.

La figure I.5 présente une comparaison de la granulométrie des sables pour les normes : ASTM C33, Georgia DOT et North Carolina. Cette figure montre que, pour la granulométrie la plus fine permise, la norme ASTM C33 autorise moins de fraction en dessous du tamis № 8 (2,36 mm) par rapport aux autres spécifications, ce qui donne un

mélange plus grossier de granulats. La spécification Georgia permet le mélange le plus fin en demandant davantage de fractions de taille plus petite que les autres spécifications.

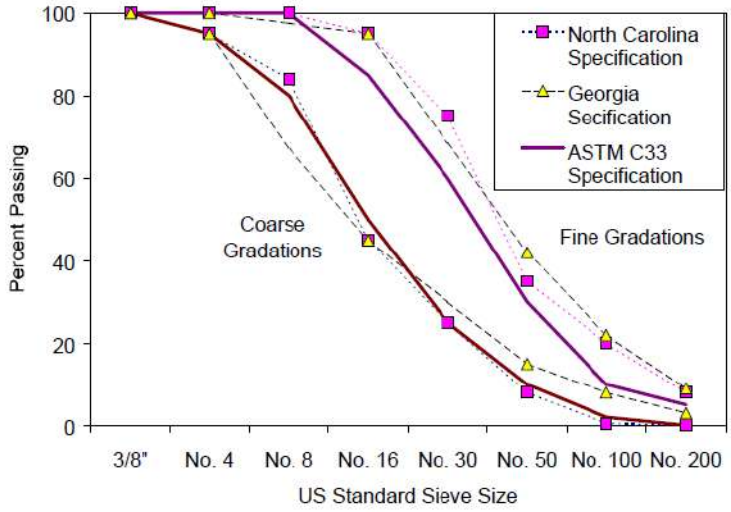


Figure I.5 : Comparaison des spécifications de granulométrie des sables

Le degré d'impact résultant de la modification de la granulométrie du SC dépend du dosage du béton. Nichols [1982] a rapporté que le changement de granulométrie d'un SC donné avait «peu ou pas d'effet» sur la demande en eau. Cependant, à mesure que la teneur en micro-fines augmentait, le béton plastique présente un ressuage «nettement moins» que le béton conforme à la norme ASTM C33. L'effet sur les propriétés de résistance variait avec la teneur en ciment et non avec les changements de granulométrie. Le même auteur a suggéré que l'augmentation du nombre de fines a abaissé le module de finesse (FM) et la quantité totale de sable nécessaire pour produire un mélange exploitable. La réduction en sables devrait compenser l'augmentation de la demande en eau résultant de la présence de fines. En conclusion, la granulométrie des sables n'affecte pas la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance au gel-dégel autant que la composition du mélange.

I.3.6 Teneur en argile et composants nocifs

Les particules d'une taille inférieure à 80 µm (75 mm selon l'ancienne norme) peuvent se présenter sous trois formes différentes : argile, limon ou poussière. L'argile est un matériau minéral naturel ayant des propriétés plastiques et composé de très fines particules. La fraction minérale argileuse d'un sol est généralement considérée comme la fraction constituée de particules plus fines que 2 µm. Les minéraux argileux sont essentiellement des silicates d'aluminium hydratés ou parfois des silicates de magnésium hydratés [ACI 116, 1985].

I.4 Effet du sable de concassage sur les propriétés du béton frais

I.4.1 Besoin en eau de mélange

De nombreux chercheurs ont constaté une augmentation de la demande en eau du béton lorsque le pourcentage des fines augmente dans les SC. L'observation semble contradictoire avec l'affirmation antérieure, selon laquelle la fraction de moins de 75 µm contribue à la lubrification du béton plastique. Celik et Marar [1996] ont noté que, sans ajustement des proportions des granulats (sable et graviers), la surface spécifique des particules d'agrégat augmentait avec l'augmentation du pourcentage de poussière de fracture. Ils ont attribué l'augmentation de la demande en eau à la surface spécifique accrue.

Ahmed et El-Kourd [1989] ont testé le béton à affaissement constant. Le béton fait pour avoir un affaissement constant de 10 ± 1,5 cm, nécessitait plus d'eau à mesure que la teneur en fines dans le sable augmentait. Comme le montre la figure I.6, le rapport E/C nécessaire pour maintenir un affaissement constant était plus élevé pour le SN que pour le SC ayant le même contenu en fines.

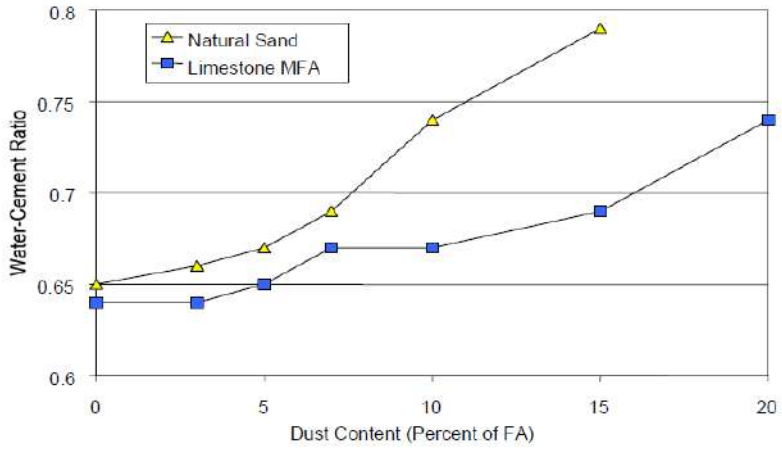


Figure I.6 : Influence du type de sable et de la teneur en fines au rapport E/C [Ahmed, 1989]

I.4.2 Teneur en air

Celik et Marar [1996] ont préparé des échantillons de béton avec des teneurs constantes en : eau (E/C), sable, gravier et ciment. La seule variation concerne le pourcentage des fines dans le SC. Des mesures de la teneur en air ont été effectuées pour les différents mélanges avec les résultats indiqués par la figure I.7.

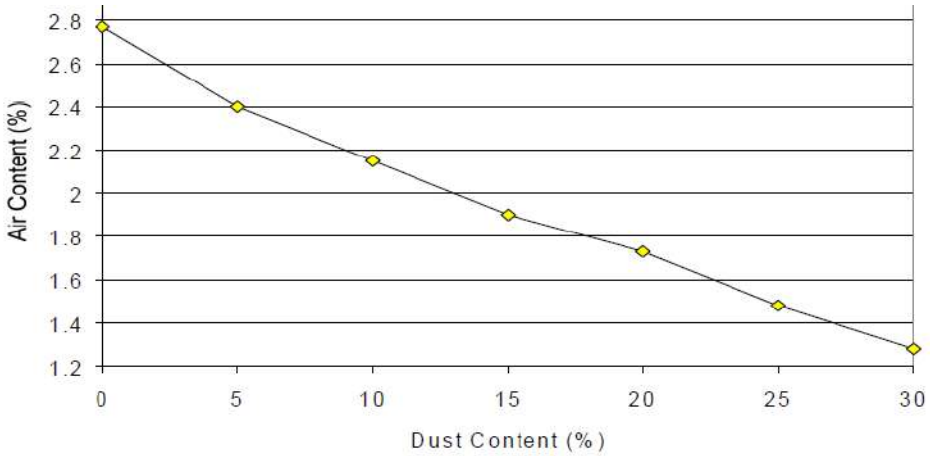


Figure I.7 : Effet de la teneur en fines dans le SC sur l'air occlus [Celik et Marar, 1996]

I.5 Effet du sable de concassage sur les propriétés du béton durci

I.5.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton contenant des teneurs plus élevées en fines de concassage s'est révélée comparable à celle du béton conforme à la norme ASTM C33 dans de nombreuses études. Dukatz et Marek [1985] ont rapporté que le béton fabriqué avec du SC contenant jusqu'à 7% de fines obtenait une résistance à la compression égale ou supérieure à celle d'un béton fabriqué avec du SN avec le même rapport E/C. Malhotra et Carette [1985] ont rapporté que, pour les bétons ayant un rapport E/C de 0,70 et une teneur croissante en fines, la résistance à la compression était aussi bonne ou meilleure que celle du béton témoin à tous les âges. La figure I.8 montre la relation entre la teneur en fines calcaires de concassage dans le SC, l'âge et la résistance à la compression du béton.

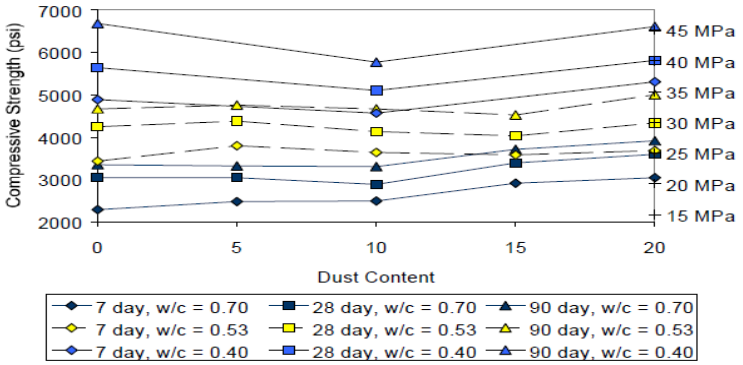


Figure I.8 : Relation entre l'âge, le rapport E/C, la teneur en fines et la résistance à la compression [Celik et Marar, 1996]

Pour le béton de E/C = 0,70, la résistance à la compression augmentait avec la teneur en fines et l'âge pour tous les échantillons. Le béton à E/C = 0,53, a montré une résistance constante pour toutes les teneurs en fines. La résistance du béton fabriqué avec E/C =0.4,

a diminué lorsque la teneur en fines dans le SC était de 10% par rapport au témoin. Mais, il a la même résistance que le témoin avec du SC contenant 20% de fines.

Comme le montre la figure I.9, Ahmed et El-Kourd [1989] ont rapporté que, dans le cas d'un béton à affaissement constant, la résistance à la compression diminuait linéairement avec l'augmentation des pourcentages de fines de concassage dans le SC. En revanche, le béton fabriqué avec un rapport E/C constant, qui vaut 0,70, a montré une résistance à la compression croissante à mesure que les fines dans le SC augmentaient. Cela à cause de la demande en eau accrue nécessitant par l'affaissement constant des mélanges du béton.

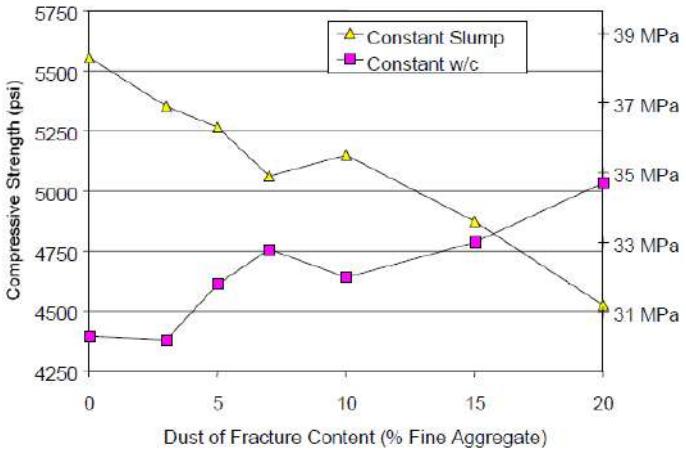


Figure I.9 : Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours du béton en fonction de la teneur en fines dans le SC avec un rapport E/C constant et un affaissement constant [Ahmed et El-Kourd, 1989]

Ahmed [1989] rapporte que le béton à base de SC était plus résistant à tout âge que le béton à base de SN. La figure I.10 montre la résistance à la compression à 28 jours du béton fabriqué avec du SC calcaire et du SN. Les deux mélanges de béton avaient un rapport E/C constant. En général, la résistance a augmenté en fonction de l'augmentation de la teneur en fines dans le sable.

Le béton de SN a montré une diminution de la résistance à la compression pour les pourcentages de remplacement de 3, 5 et 15% de fines par rapport au mélange de 0%. Le béton de SN contenant 7 et 10% de fines a montré une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours. La diminution de la résistance à la compression dans le béton de SN est attendue par les normes actuelles, qui incluent les limitations des fines. L'augmentation de la résistance à la compression dans le béton à base de SC n'est pas prévue par les normes actuelles, ce qui empêche de tirer parti des avantages du matériau.

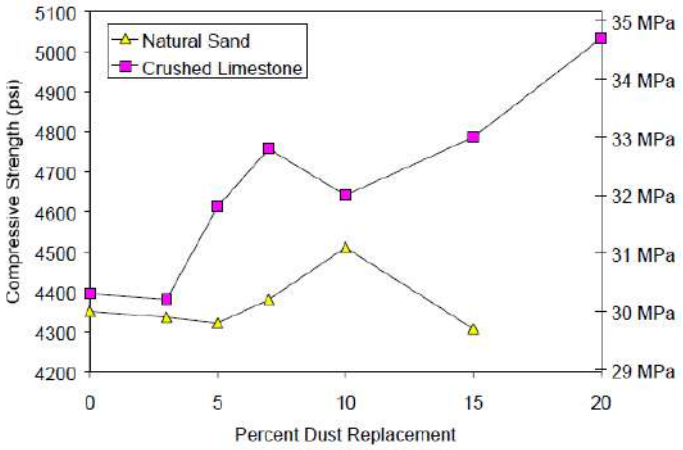


Figure I.10 : Influence de type de sable sur la résistance à la compression à 28 jours du béton [Ahmed et El-Kourd, 1989]

Bonavetti et Irassar [1994] ont étudié l'effet de la teneur en poussière de pierre dans le mortier. Les essais ont été réalisés avec du calcaire, du quartz et des fines de concassage avec du SN. Le SC n'a pas été utilisé en raison de la différence de granulométrie, forme et texture des particules. Les cubes de mortier ont été mélangés pour obtenir un affaissement constant avec un rapport ciment/sable de 1/3 combiné avec 5, 10, 15 et 20% du sable remplacé par des fines de concassage. Les cubes testés contenant de la poussière de quartz avaient une résistance à la compression accrue à tous les pourcentages de remplacement du sable et à tous les âges. Les cubes contenant du granit ont eu des résultats atténués. Les cubes remplacés à 5% avaient une résistance à la compression supérieure à tous les âges par rapport aux cubes de mortier de contrôle. Les cubes contenant 10% de substitut de fines avaient une résistance inférieure à la moyenne à 7 jours, mais supérieure à la moyenne à 28, 90 et 180 jours. Les échantillons contenant 15 et 20% de matériaux de remplacement de fines présentaient une compression plus faible à tous les âges que les échantillons de mortier témoin (0% de fines). Les échantillons de calcaire ont rapidement pris de la résistance, ce qui a fini par s'aligner sur la résistance du groupe témoin. Les échantillons de mortier remplacés à 5, 10 et 15% étaient plus résistants que le mortier témoin, tandis que le mortier à 20% de remplacement présentait une résistance à la compression égale à 95% de celle du témoin à 180 jours.

I.5.2 Résistance à la flexion

Celik et Marar [1996] ont rapporté que lorsque la teneur en fines de concassage augmentait de 10%, la résistance à la flexion à 28 jours augmentait de 10% par rapport aux échantillons témoins sans fines. Lorsque la teneur en fines a été augmentée à 30%, la

résistance à la flexion à 28 jours a diminué de 10% par rapport au béton témoin. Malhotra et Carette [1985] ont testé la résistance à la flexion d'un béton contenant divers pourcentages de fines de concassage avec des rapports E/C de 0,70, 0,53 et 0,40 à 14 et 70 ± 5 jours. La résistance à la flexion pour chaque E/C était égale ou supérieure à la résistance à la flexion du mélange témoin pour le rapport E/C correspondant, comme le montre la figure I.11. L'augmentation de la teneur en fines n'a pas eu d'effet négatif sur la résistance à la flexion. L'influence la plus significative sur la résistance à la flexion est le rapport E/C.

Bonavetti et Irassar (1994) ont testé la résistance à la flexion de mortiers contenant jusqu'à 20% de fines de concassage. Pour tous les pourcentages de remplacement, le béton présentait une résistance à la flexion accrue à tous les âges par rapport au béton témoin.

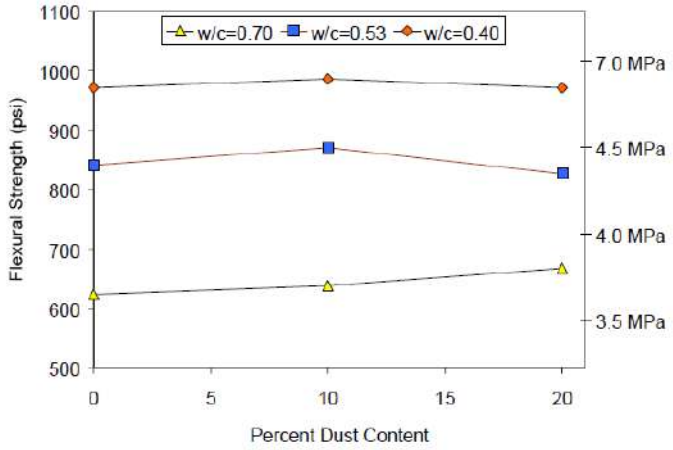


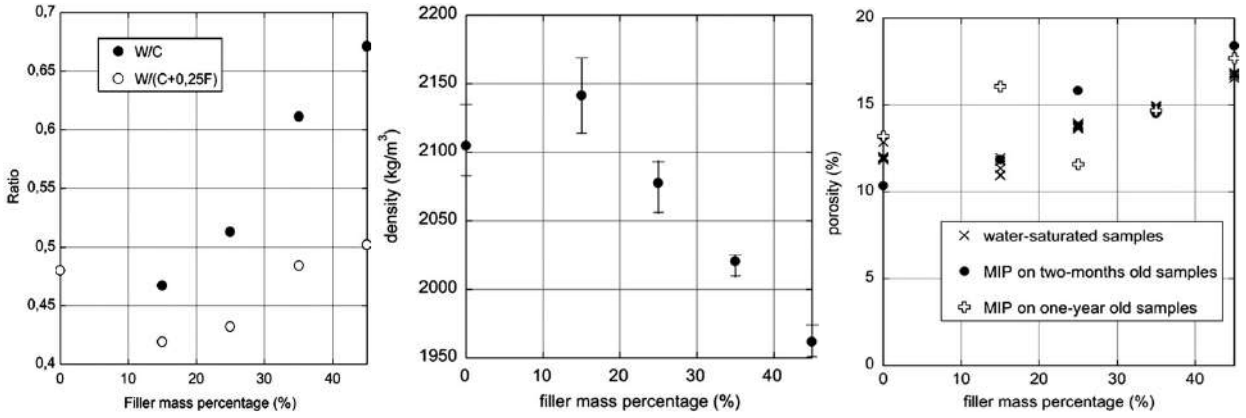
Figure I.11 : L'évolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en fines [Malhotra, 1985]

I.6 Travaux Algériens sur le sable calcaire de concassage

Dans le cadre de la valorisation du SC Algérien, plusieurs travaux ont été achevés jusqu'ici [Safiddine, 2018]. En ce qui suit, on va citer quelques résultats obtenus par les chercheurs Algériens dans ce contexte.

Une autre étude, réalisée par Benachour et al. [2008], s'est intéressée par le sable calcaire algérien contenant des proportions de fines élevées, atteindre 45% de la masse de sable. A cet effet, des mortiers ont été formulés en ajoutant des fines calcaires par substitution au sable, avec une ouvrabilité constante. Les propriétés microstructurales, mécaniques et de durabilité ont été étudiées simultanément en utilisant des techniques expérimentales variées. L'absence de constituants argileux potentiellement nocifs a été vérifiée par l'analyse XRD, tandis que la diminution du module de finesse du mélange sec (sable +

fines) est prouvée comme étant conforme aux normes autorisées jusqu'à 35% des fines. La figure I.12 représente l'évolution du besoin en eau en terme du rapport habituel E/C et du rapport réel E/(C+0,25F) en raison de l'activité calcaire (selon la norme française XP P18- 305). Elle est montrée qu'il y a une diminution de la demande d'eau jusqu'à 15% de fines, puis la demande d'eau augmente pour des teneurs en fines plus élevées. C'est la conséquence de deux effets opposés. De part, l'eau est adsorbée à la surface des particules de fines. Comme la surface spécifique des fines est plus élevée que celle du sable, la demande d'eau augmente du fait du phénomène d'adsorption. D'autre part, les particules fines remplissent les vides de sorte que l'eau a moins d'espace poreux disponible. Dans l'ensemble, moins d'eau libre est présente alors que la quantité d'eau adsorbée augmente. La porosité suit une évolution similaire au besoin en eau. La densité atteint un maximum situé entre 0 et 25% de fines, de sorte que l'effet de remplissage habituel est mis en évidence et perd moins de 10% de la valeur de référence (0%) à 45% de fines.



a) b) c)

Figure I.12 : Evolution : a) des rapports E/C et E/C_{eq} b) de la densité c) de la porosité, en fonction de la teneur en fines dans le sable [Benachour, 2008].

Quant à eux, le module de Young et la perméabilité intrinsèque suivent symétriquement l'évolution du besoin en eau, c'est-à-dire de la porosité. En effet, la rigidité du mortier est directement entraînée par sa porosité : lorsque la porosité augmente, le module de Young diminue, c'est-à-dire que le mortier devient plus souple. L'augmentation de la porosité fournit également plus de place pour que le gaz passe à travers le mortier, ce qui induit une augmentation correspondante de sa perméabilité. De manière plus intéressante, la perméabilité intrinsèque reste inférieure ou équivalente à celle sans fines, pour des quantités de fines allant jusqu'à 35%. La performance mécanique (compression et flexion) est améliorée par addition de fines, ou reste équivalente à la valeur de référence.

Des résistances optimales en compression et en flexion sont obtenues entre 0 et 25% de pourcentage de masse de fines. Ceci est interprété comme étant dû à l'effet de remplissage de vide et au renforcement de la pâte de ciment (et / ou à la consolidation de la colle de ciment / agrégat de sable) permise par la présence de fines. A la lumière de cette étude, on conclut que les proportions de fines calcaires de 0 à 100 μm de masse de sable allant jusqu'à 35%, soit 105% de masse de ciment, n'affectent pas particulièrement les performances mécaniques, le retrait et la perméabilité : c'est économiquement important, en particulier en Algérie [Benachour, 2008].

Autre étude, a été réalisée par Menadi et al. [2009], examinant l'influence des fines calcaires de concassage sur les performances du béton (Figure I.13). Quatre types différents de ciment ont été utilisés tout en maintenant un rapport E/C constant.

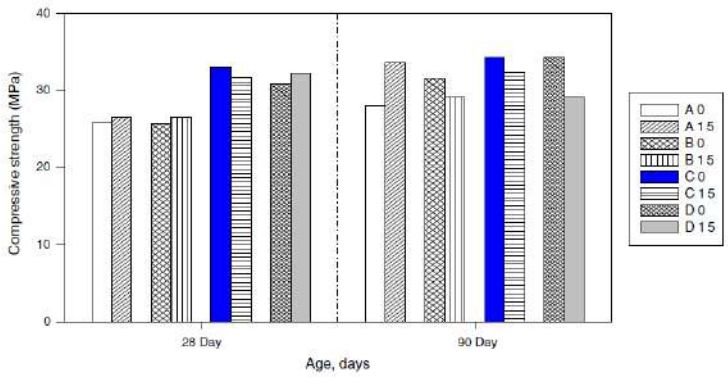


Figure I.13 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression de divers mélanges de béton [Menadi, 2009].

Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'incorporation de 15% des fines calcaires dans le béton a entraîné une réduction de la résistance à la compression à 90 jours, à l'exception A15. Ainsi, il a provoqué une augmentation de la pénétration de chlorure et de la perméabilité aux gaz, tout en réduisant la perméabilité à l'eau.
- La résistance à la pénétration des ions chlorure et à la perméabilité aux gaz a diminué pour tous les mélanges de béton avec l'inclusion des fines calcaires à 15% de masse de sable.

A cet effet, la teneur en fines calcaires dans le sable devrait être limitée pour les structures exposées au milieu marin.

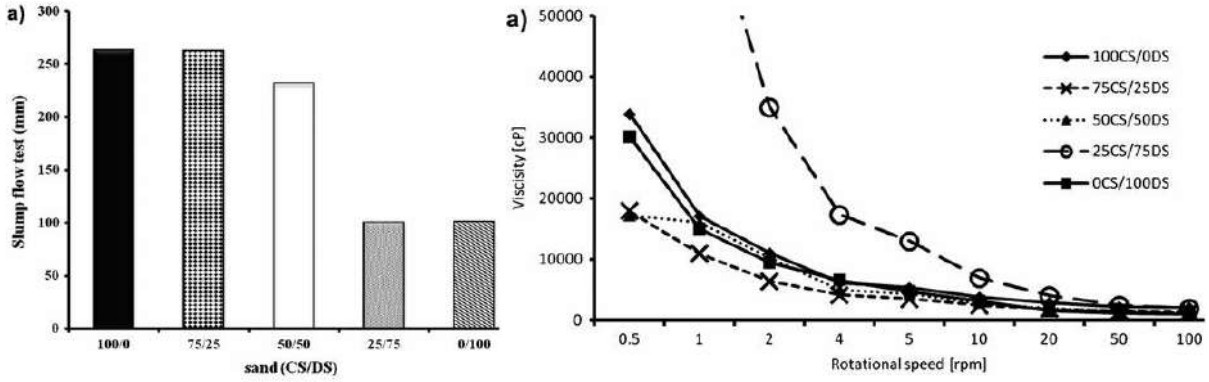
Pour évaluer l'effet de différents types de sable sur les propriétés du BAP, une approche statistique a été proposée par Bouziani [2013]. En effet, une méthode de modélisation du

mélange a été utilisée pour mettre en évidence les effets du sable de rivière (RS), du sable concassé (CS) et du sable de dune (DS) dans les systèmes binaires et ternaires, sur la fluidité, la capacité de remplissage, la ségrégation et la résistance mécanique des BAP. Les réponses des modèles statistiques dérivés sont l'affaissement, le temps V-funnel, le L-box, la stabilité et la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours. Les modèles mathématiques dérivés permettent d'illustrer la variation des différentes réponses à partir des courbes dans un contour ternaire par rapport aux proportions de RS, CS et DS. Cela offre la souplesse nécessaire pour optimiser les mélanges RS, CS et DS conviennent à des recommandations particulières. Les résultats ainsi obtenus, ont indiqué que les exigences de fluidité sont satisfaites si les proportions de CS dans les systèmes binaires avec RS ou ternaires sont inférieures à 60%. De plus, il a été montré que la capacité de remplissage peut être satisfaite en utilisant une proportion de CS supérieure à 30% dans le système binaire RS-CS et supérieure à 65% dans le système binaire CS-DS. D'autre part, des proportions supérieures à 50% de CS dans le système binaire RS-CS sont recommandées pour respecter les limites de stabilité. Les résultats ont indiqué également que la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours augmente avec l'augmentation de la proportion de CS dans les systèmes binaires et ternaires. L'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée au haut contenu des fines de concassage et à la forme angulaire des grains CS qui peuvent améliorer sa compacité [Bouziani, 2013].

Des essais, ont été réalisés par Bedrina et al. [2013], examinant l'effet de substitution du sable siliceux alluvionnaire (0%, 50% et 100%) au sable calcaire de concassage, sur la durabilité des mortiers exposés à différents milieux chimiques. Les résultats montrent que la présence du SC a un effet positif sur la durabilité. En plus, l'effet néfaste de HCl sur la durabilité a été considérablement réduit avec l'introduction du sable concassé. Cependant, cette substitution induit une amélioration de la résistance mécanique et à l'attaque par l'acide, ainsi une réduction : de perméabilité, de pertes de masse et de phénomène d'ascension capillaire [Bedrina, 2013]. Dans le même contexte et à travers une autre étude réalisée par Benabed et al. [2012], il a été démontré que l'utilisation d'un SC riche en fines calcaires peut être une source alternative fructueuse des ajouts minéraux. Les résultats expérimentaux indiquent que les propriétés rhéologiques et la résistance s'améliorent avec des mélanges binaires de SCs et de sables fluviaux mais diminuent avec des mélanges binaires de SC et dunaire, en particulier pour une teneur en sable dunaire plus élevée. Ainsi, le SC calcaires avec 10 à 15% de fines peut être utilisé avec succès dans la production du BAP avec de bonnes performances rhéologiques et mécaniques

[Benabed, 2012].

Ainsi, Benabed et al. [2014], ont étudié les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers auto plaçant. Des mélanges de mortier ont été préparés avec du sable concassé (CS), remplacé par du sable de dune (DS) à des pourcentages différents étalant de 0 à 100%. Cependant, lors d'un remplacement de DS avec des grands pourcentages (≥75%), les mélanges deviennent plus fermes avec un écoulement plus lent et la viscosité du mélange augment (Figure I.14). Ainsi, le comportement visqueux des mortiers dominant pour des vitesses de rotation faibles, tandis qu'à des vitesses plus élevées, le comportement fluide devient dominant. Cependant, la résistance à la compression et à la flexion a été affectée légèrement par une augmentation du remplacement de DS [Benabed, 2014].



a) b)

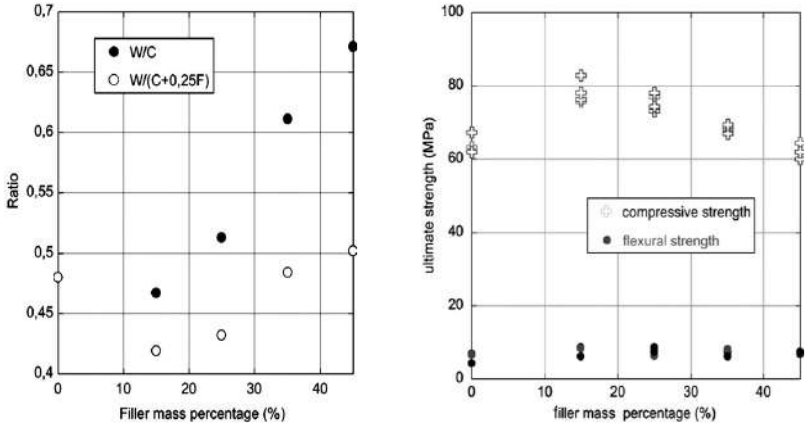
Figure I.14 : Effet de la teneur en DS sur a) le mini-slump et b) les mesures de la viscosité, des mortiers à base de sable binaire (CS / DS) [Benabed, 2014].

Plus récemment, les mêmes auteurs ont entrepris une étude expérimentale, Benabed et al. [2016], pour déterminer l'effet de la teneur en fines calcaires de concassage sur les propriétés fraîches et durcies des mortiers de réparation autoplaçant (MRAP). Les MRAP ont été préparés en utilisant du sable concassé partiellement substitué par ces fines à des pourcentages variables allant jusqu'à 30%. Les résultats ont indiqué que les fines calcaires en tant que substituant du sable améliorent significativement les propriétés fraîches et durcies des MRAP avec une teneur optimale entre 10-15%. A cet effet, l'utilisation de ces fines dans le MRAP offrirait des avantages techniques, économiques et environnementaux [Benabed, 2016].

I.7 Travaux algériens sur les fines calcaires de concassage

Une étude a été faite par Benachour et al. [2008], visant l'effet des fines de SC sur les performances du mortier. Tout d'abord, les fines calcaires de SC ont été analysées par DRX. L'analyse confirme qu'il n'y a pas autres minéraux que calcite $CaCO_3$ et des traces

de dolomite $CaMg(CO_3)_2$. Les résultats obtenus montrent l'existence d'une valeur de performance optimale (Figure I.15). En particulier, pour des teneurs élevées de fines, la porosité diminue. Ceci est confirmé par les examens MEB de la microstructure et par des résultats d'absorption capillaire. En outre, la résistance à la compression et à la flexion reste remarquablement élevée quelle que soit la proportion de fines. Le retrait de séchage et la perte de masse ne sont pas touchés de façon spectaculaire.



a) b)

Figure I.15 : Variation a) du rapport E/C et b) de la résistance à la compression et à la flexion en fonction du taux de filler [Benachour, 2008].

D'autres recherches ont été réalisées en Algérie par Guemmadi et al. [2009], dans le but de déterminer le critère optimal d'utilisation de fines calcaires dans les mélanges cimentaires. Dans la même année, Sadhouari et al. [2009] ont trouvé que les bétons formulés avec deux SCs locaux (Kristel et Sidi Ali-Benyoub) occasionnent une augmentation de résistance à la compression de 20% pour un optimum de fines de l'ordre de 15%. L'intérêt majeur de cette étude est la connaissance des effets des fines calcaires de concassage sur les caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons. Cependant, la finesse des fines calcaires joue un rôle prédominant dans l'amélioration des performances mécaniques. Les résultats obtenus montrent que la présence de ces dernières en proportion modérée (entre 5 et 15%) dans un sable est une nécessité. Autrement dit, le SC constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable de mer [Sadhouari, 2009].

Ezziane et al. [2010] ont quantifié l'effet des fines calcaires (CaO=52,6%, MgO=0,5% et 340 m²/kg) sur le début et la fin de prise de ciment (310 m²/kg) par la détermination de leur énergie d'activation. Cette dernière dépend de la qualité du ciment utilisé, le rapport

E/C et les additions minérales utilisées. Pour un remplacement jusqu'à 25 % de ciment par les fines calcaires, ils ont constaté une augmentation du temps de début et de fin de prise.

Plus récemment, Safiddine et al. [2010, 2017 et 2018], a étudié l'effet de la teneur en fines calcaires de concassage sur les propriétés rhéologiques du mortier à base de SC. En ce qui suit les principaux résultats et conclusions ainsi obtenus par ce travail de recherche.

- L'augmentation de la teneur en fines dans le SC diminue l'affaissement et augmente le temps d'écoulement des mortiers à base de SC et sable siliceux (SS). En conséquence, on observe une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique.

- Les résultats de l'essai d'affaissement sont corrélés dans certains cas avec le seuil de cisaillement, mais il existe une grande dispersion des données. Par ailleurs, le même résultat a été trouvé avec la corrélation de la viscosité avec le temps d'écoulement. Mais dans le second cas, la dispersion est plus grande. A cet effet, les essais classiques ne sont pas des méthodes fiables pour prédire la rhéologie du mortier.

- L'addition du superplastifiant (Sp) améliore les propriétés rhéologiques. On peut obtenir un comportement rhéologique similaire pour le mortier à base de SC lavé et de mortier avec 15% de fines en utilisant 0,8% de Sp. Ce pourcentage de Sp est également nécessaire pour obtenir les mêmes propriétés rhéologiques avec une teneur en fines de 20% qu'avec de 15% sans Sp.

- Le mortier à base de SC présente des valeurs de propriétés rhéologiques plus élevées par rapport au mortier à base de SN. Par conséquent, il est vraiment utile de corriger le SC par le SN pour améliorer l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques du mortier.

- Le comportement rhéologique du mortier a été fortement affecté par l'augmentation de la concentration volumique de SC.

- La corrélation entre les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons et leur mortier de béton équivalent (MBE) sont prometteurs, malgré quelque différence dans l'allure globale de l'évolution de ces propriétés en fonction de la teneur en fines dans le SC.

- En ce qui concerne les propriétés mécaniques, on a constaté que l'effet indésirable de la teneur élevée des fines calcaires de concassage peut être évité en prenant en considération leurs effets sur l'ouvrabilité par l'ajout des superplastifiants.

- Les résultats obtenus montrent qu'il y a une défaillance entre le taux d'absorption des SC, déterminé par l'essai normalisé, et la quantité réelle absorbée pendant le malaxage.

I.8 Aperçu sur la normalisation du coefficient d'absorption

Selon Dreux et Gouris [1998], plutôt que d'imposer des valeurs limites de porosité, les différents textes réglementaires considèrent, pour définir la qualité des granulats, leur coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de leur masse provoquée au bout de 24 heures par une imbibition par rapport à leur masse sèche. Ce coefficient mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif. En particulier la pénétration de l'eau dans les pores des granulats, donc du béton, fragilise la structure en cas de gel. Par

ailleurs dans un milieu à faible hygrométrie, de l'ordre de 60 à 70%, la vitesse de pénétration de la carbonatation est plus rapide. Enfin lors du malaxage du béton, l'emploi de granulats à

fort coefficient d'absorption peut provoquer une mauvaise ouvrabilité s'ils n'ont pas été pré-mouillés avant leur introduction dans le malaxeur [Dreux, 1998]. Le tableau I.1 présente les valeurs supérieures spécifiées (Vss) précisées par la norme.

Tableau I.1 : Valeurs supérieures spécifiées (Vss) précisées par la norme [Dreux, 1998]

Catégorie des granulats	Vss en (%)
A : Granulats destinés aux bétons de qualité	2,5
B : Granulats destinés aux bons bétons	5
C : Granulats destinés aux bétons courants	6
D : Granulats destinés aux bétons courants	Pas de spécif.

Rappelons que l'ancienne norme fixait une valeur maximale de 5%, qui était peu sévère pour certains bétons. De même le fascicule 65 A stipule pour les marchés publics de travaux, un coefficient d'absorption d'eau (Ab) $\leq$ 2% pour les bétons de $f_{c28} \geq 30$ MPa, ainsi que pour les BA de $f_{c28} < 30$ MPa, mais qui sont placés en atmosphère agressive sévère [Dreux,1998].

II.1 PROGRAMME EXPERIMENTAL

Comme les résultats des essais dépendent du programme expérimental, on présente dans ce chapitre le protocole des essais et les descriptions des matériaux utilisés (sable, ciment et eau).

Le programme expérimental adopté consiste à étudier un mortier composé de ciment, de sable de concassage et d'eau de gâchage.

Le protocole d'essais mis en œuvre s'intéresse surtout à l'influence des fines et le taux d'absorption sur les propriétés, la résistance et la perte d'affaissement du mortier de ciment. Pour ce faire, le protocole d'essais comprend les séquences suivantes:

- lavage de sable de concassage ;
- préparation des échantillons de sable contiennent un pourcentage de fines vaut 12% du leur poids ;
- procéder aux essais physiques sur le sables utilisé : sable concassé (SC) et sable roulé (SR) ;
- procéder aux mesures de taux d'absorption de sable suivant des pourcentages de fines et pour différente temps d'imbibition dans l'eau ;

Cependant, la composition type est similaire au mortier 1/3; soit 2100g de sable, 700g de ciment et 490g d'eau.

On a préparé des mortiers en tenant compte des différents cas suivants :

- Sable concassé à un taux d'absorption mesuré selon la norme.
- Sable concassé imbibé 24 h dans l'eau.
- Sable concassé imbibé 1/2 h dans l'eau.
- Sable roulé à un taux d'absorption mesuré.

En revanche, E/C correspond au rapport pondéral du dosage en eau et du dosage en ciment. Le pourcentage de fines est le dosage pondéral en extrait sec de fines par rapport le poids total du sable.

II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, qui sont disponibles dans le marché Algérien. Cependant, les sables (SC et SR) est proviennent des gisements situé dans la wilaya de Médéa.

II.2.1 LE SABLE

- **SC Site d'extraction :** Gisement de djebel Mongorno (Wilaya de Médéa).
- **SR Site d'extraction** : Gisement de Boughezoul (Wilaya de Médéa).
- **Caractéristiques chimiques :**

Le tableau II.1 résume les résultats des analyses chimiques effectuées au laboratoire du LCTP Alger.

Constituant (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ca O	K_2O	SO_3	P.F
Sable de concassage	2,50	2,63	0,58	70,69	-	Traces	24,77

Tableau II.1 : Analyses chimiques du sable utilisé

- **Caractéristiques physiques :**

1. Masse volumique absolue : 2.60 t/m^3
2. Masse volumique apparente : 1.65 t/m^3
3. Forme : irrégulière

Quatre classes du sable sont utilisées dans cette étude:

- Un sable lavé 0% de fines : désigné par SC0;
- Un sable semi lavé avec 5% de fines : désigné par SC1 ;
- Un sable contient 12% de fines : désigné par SC2 ;
- Un sable brut (0.063/5.0 mm) : désigné par SC3 ;
- Un sable roulé : désigné par SR ;



Sable roulé à 12% de fines SR



Sable lave à 0% de fines SC0



Sable semi lavé à 12% de fines SC2



Sable brut à 18% de fines SC3

Figure II.1: Les différentes catégories du sable.

II.2.2 LE CIMENT

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland artificiel nommé CPJ-CEM II - 42,5 provenant de la cimenterie ACC M'Sila, ses caractéristiques sont regroupées dans les tableaux suivants :

Tableau II.2 : Analyses chimiques du ciment

Composition chimique	**(%)**
Teneur en anhydride sulfurique SO_3	1.80 – 2.35
Teneur en magnésie MgO	1.60 – 1.80
Teneur en Chlorures	0.03
Résidus insolubles	1.35
Perte au feu	9.75

Tableau II.3 : Composition minéralogique du clinker

Composition minéralogique	**(%)**
Silicates tricalciques, C_3S	61
Silicates bicalciques, C_2S	15
Aluminates tricalciques, C_3A	7
Aluminoferrites tetracalciques, C_4AF	11

Tableau II.4 : Propriétés physiques du ciment

Consistance normale de pâte de ciment (%)	25.50 – 26.50
Finesse suivant la méthode de Blaine	4700
Chaleur d'hydratation (J/g)	< 310
Retrait à 28 jours (μm/m)	< 1000
Expansion (mm)	1.4
Temps de début de prise (heure : min) à 20°C	2 : 45
Temps de fin de prise (heure : min) à 20°C	4 : 05

Tableau II.5 : Résistance à la compression

Type d'essais (EN 196 / mortier)	CPJ – CEMII – 42,5
Résistance à la compression à 02 jours (bars)	160 – 200
Résistance à la compression à 28 jours (bars)	> 425

II.2.3 L'EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier est une eau potable de robinet, exempte d'impuretés. Conforme à la norme NFP 18-303 et EN 1008.

II.3 PREPARATION DES MATERIAUX

II.3.1 PRELEVEMENT D'ECHANTILLON DE SABLE SUR STOCK

Le prélèvement d'échantillon a été fait en deux étapes: la première consiste à prendre des échantillons des sables en gros lot au niveau de la station de concassage, en deuxième étape, l'échantillon est réduit au niveau du laboratoire après tamisage, lavage et étuvage.

II.3.2 LAVAGE DU SABLE

Le lavage a été effectué sous l'eau du robinet en procédant au tamisage du sable brut avec un tamis de maille Ø = 0,080 mm. Le but de cette tache c'est la récupération des fines et l'obtention de la classe SC3 (sable lavé), et la classe SC2 (sble semi lavé) (Figure 2.2).



Figure II.2 : Lavage du sable et récupération des fines par voie humide.

II.3.3 PREPARATION DES MELANGES

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle maintenue à une température de 20°C ± 2C° et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Le mélange doit être effectué par malaxage pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1, au moyen du malaxeur spécifié par la norme NF P 15-411 (figure 2.3), selon la procédure suivante :

a) préparation :

- La pale du malaxeur doit être réglée à 4.5 mm du bol.
- Pour les premiers mélanges, il est conseillé de mouiller le récipient du malaxeur puis de l'essuyer afin qu'il présente la même humidité que les gâchées courantes.

b) Malaxage:

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur; y verser ensuite le ciment; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable déjà préparé (dans le cas de mortier) pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, racler les bords du récipient.
- rependre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau après :

Tableau II.6 Récapitulation des opérations de malaxage [Dupain et al, 2000].

Opérations	*Introduction de l'eau*	*Introduction de ciment*		*Introduction du sable*		*Raclage de la cuve*		
Durée des opérations			*30 s*	*30 s*	*30 s*	*15 s*	*1 min 15 s*	*60 s*
Etat du malaxeur	*Arrête*		*Vitesse lente*		*Vitesse rapide*	*Arrête*		*Vitesse rapide*



Figure II.3 : Malaxeur normalisé pour pâte et mortier

II.4 DESCRIPTION DES MELANGES ET DESIGNATION

II.4.1 LE MORTIER

Dans le cas du mortier, on fixe le rapport Sable/Ciment ou le rapport Eau/Ciment afin d'étudier l'influence du taux d'absoption du sable.

La désignation du mortier se base sur le pourcentage des fines dans le SC et la méthode d'ajouter l'eau d'absoption dans le mortier.

Tableau II.7 : Nomenclature des mortiers

Fines (%)	**0**	**5**	**12**	**18**
Mortiers avec (SC) S/C=3	M0SC0	M0SC1	M0SC2	M0SC3
Mortiers avec (SR) S/C=3	M0SR			

Taux d'bsoption (%)	**Mortiers avec (SC) S/C=3**	**Mortiers avec (SR) S/C=3**
1.2	/	M0SR
5.31 eau ajouté au moment de malaxage	M0SC2	
5.31 Le SC utilisé est imbibé 24 h	M24SC2	
4.36 Ab 30 min	M0SC2*	

II.5 METHODE D'ESSAIS

Les essais réalisés sur les matériaux sont les essais physiques, chimiques. Ces essais ont été réalisés dans les laboratoires de : Hall Technologique de l'Université « Yahia Fares » de Médéa.

II.5.1 ESSAIS EFFECTUES SUR LE SABLE

II.5.1.1 Equivalent de sable [NA456]

Le procédé de l'essai consiste à mettre la propreté du sable en évidence, l'essai a été effectué selon la norme NA456 (Figure 2.4).

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante qui permet de séparer les éléments fins argileux et en provoque la floculation ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1) et du sédiment + floculant (H_2).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante:

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \qquad \text{..... (1)}$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.



Figure II.4 : Essai d'équivalent de sable.

II.5.1.2 Analyse granulométrique [EN 933-1 et EN 933-2]

L'analyse granulométrique consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé à la partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis à l'aide d'une tamiseuse électrique (Figure 2.5). L'essai a été réalisé selon la norme actuelle EN 933-2.

Tamis	Module
Provenance	
12,5	42
10	41
8	40
6,3	39
5	38
2,5	35
0,315	32



Figure II.5 : Tamiseuse électrique

La présente norme a pour objet de définir les granulats et leur classification d'après les dimensions de leurs grains et de fixer la méthode à suivre pour l'analyse et le tracé de la courbe granulométrique. Cette norme s'applique aux granulats utilisés dans le bâtiment et les travaux publics, destinés notamment aux usages routiers ou à la confection des bétons de construction et dont la granularité est déterminée par tamisage.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

La forme de la courbe granulométrique représente la distribution de la dimension de la particule. Cette distribution peut être qualifiée d'uniforme si les dimensions des particules sont voisines. La courbe granulométrique est caractérisée par deux coefficients :

- le coefficient d'uniformité : $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ ……..**(2)**
- le coefficient de courbure : $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} . d_{60}}$ ……..**(3)**

Avec : d_{10} : Diamètre moyen des grains correspondant à 10% passant par poids. d_{30} : Diamètre moyen des grains correspondant à 30% passant par poids.

d_{60} : Diamètre moyen des grains correspondant à 60% passant par poids.

La distribution des dimensions des particules est dite :

- bien graduée si : $C_u > 10$

- étalée si : $2 < C_u < 10$
- uniforme ou serrée si : $C_u < 2$

D'une courbe granulométrique, on peut tirer les renseignements suivants :

- les limites de d à D du granulat considéré ;
- la proportion d'éléments fins ;
- la continuité ou la discontinuité de la granularité.

II.5.1.3 Module de finesse [NF P 18-304]

Le module de finesse ***Mf*** d'un granulat étant presque exclusivement vérifié sur les sables. Il est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante: 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5- et 5mm.

II.5.1.4 Masse volumique [NF P18-545]

Il s'agit de mesurer le volume absolu et apparent en vrac du sable.

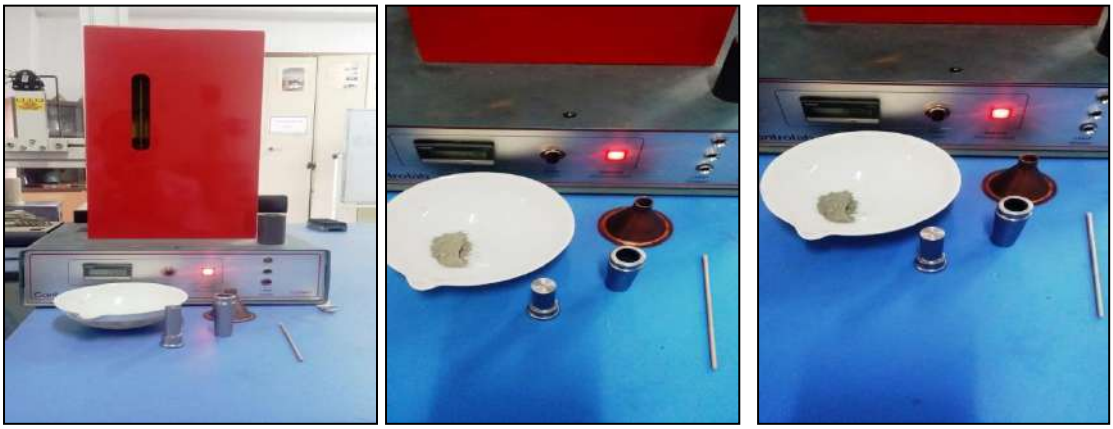
II.5.1.5 Surface Spécifique [EN 196-6]

Principe de la mesure :

Perméabilimètre de Blaine à mesure de temps automatique selon EN 196-6 et ASTM C204 Détection des niveaux par des cellules photo-électriques.

Conduit de l'essai :

Après la mise en place de la cellule remplie de son échantillon de ciment ou fines de sable, il suffit de presser le bouton départ pour que la pompe électrique d'aspiration se mette en marche et que l'essai commence. A la fin automatique de l'essai, le temps de passage s'affiche et restera maintenu jusqu'au nouvel essai.



Perméabilimètre de Blaine **ciment** **fine de sable concassé**

Figure II.6: Détermination de la surface spécifique.

II.5.1.6 Taux d'absorption des sables [NF P18-555]

Principe de la mesure :

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon.
Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 %C. (Figure 2.7, 2.8) et on mesure ensuite le taux d'absorption des sables par la formule suivante :

$$\mathbf{Ab(\%)} = \frac{\mathbf{M_1 - M_2}}{\mathbf{M_2}} \times \mathbf{100} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{(4)}$$

Avec : **M1 :** masse de l'échantillon sec après passage a l'étuve a 105 °C.

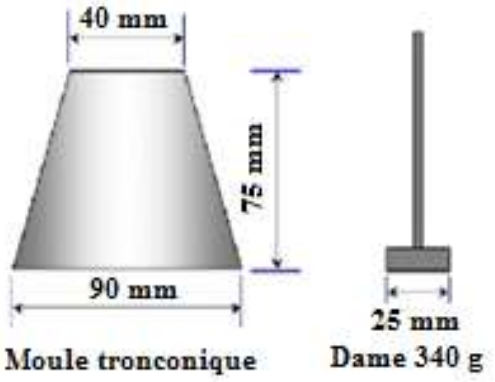
M2 : masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée.

Conduit de l'essai :

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération.

les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.

On peut vérifier que cet état a été atteint en pla1ant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (figure II.8 et II.9).





Moule tronconique

Figure II.7: Détermination du coefficient d'absorption SC.

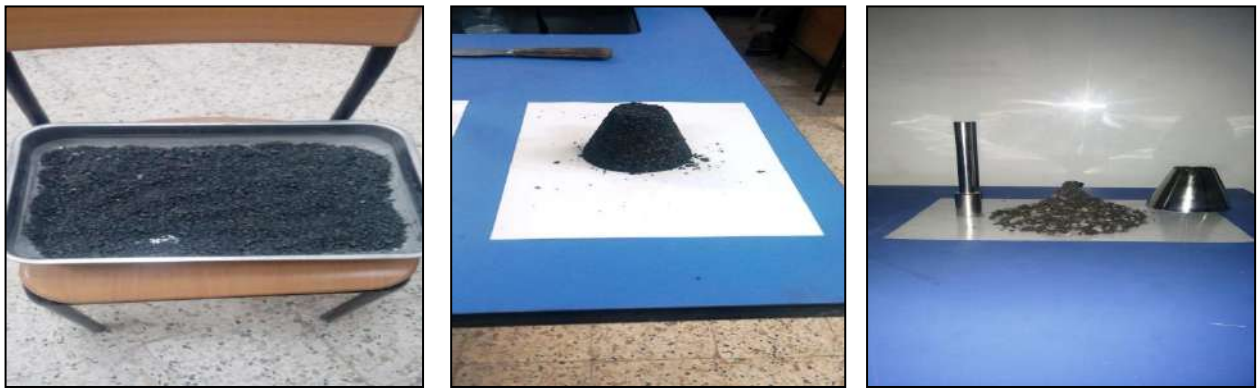


Figure II.8: Détermination du coefficient d'absorption SR.



II.5.2 ESSAIS EFFECTUES SUR MORTIER FRAIS

II.5.2.1 Essai au maniabilimètre [NF P 18-452 et NF P15-437]

a) Objectif de l'essai

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance, c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18-452 et NF P 15-37.

b) Principe de l'essai

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

c) Equipement nécessaire

L'appareil utilisé s'appelle Maniabilimètre B, il est schématisé sur la figure II.9.

Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (18 cm x 9 cm x 9 cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipe d'un vibrateur et muni d'une cloison amovible.

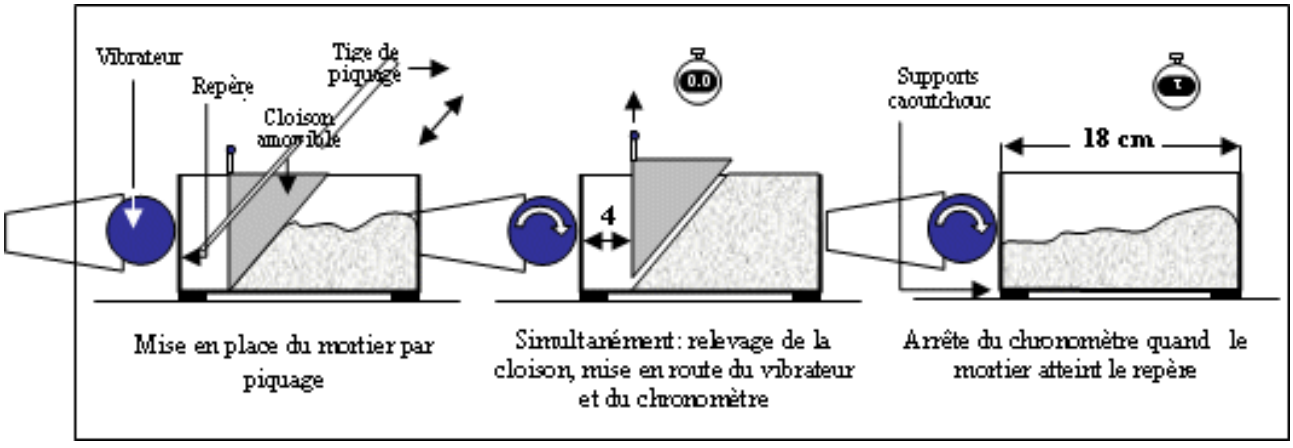


Figure II.9 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

d) Conduite de l'essai

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 3 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté

quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil.



Figure II.10 : Essais sur la consistance du mortier (Maniabilimètre B)

II.5.2.2 Mesure de l'affaissement

De manière à balayer une large gamme de consistance, deux types de mesures sont effectués après soulèvement du cône : l'affaissement ou l'étalement du mortier

a) Principe de l'essai :

Il s'agit de constater l'affaissement ou l'étalement de mortier sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le mortier sera réputé fluide.

b) Equipement nécessaire :

L'appareillage se compose de 4 éléments:

- un moule tronconique sans fond, de 70 mm de haut, de 100 mm de diamètre en sa partie inférieure et de 70 mm de diamètre en sa partie supérieure ;
- une plaque d'appui ;
- une tige de piquage ;
- une régle de mesure.

c) Conduite de l'essai :

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé. Le mortier est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en places au moyen de la tige de la tige de piquage actionnée 6 fois par couche (la tige doit pénétrer la

couche immédiatement inférieure). Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le cône en ±2 secondes et ce, le plus verticalement possible avec précaution. La mesure de l'affaissement doit être effectuée sur le point le plus haut du mortier et dans la minute qui suit le démoulage.



Figure II.11 : Développement de l'essai d'affaissement pour le mortier.

II.5.2.3 L'air occlus:

a) Objectif de l'essai :

Pour la mesure de l'air occlus dans le mortier frais, on a utilisé la méthode dite « par pression ».

b) Principe de l'essai :

Comme le seul élément compressible dans le mortier frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au mortier frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le mortier.

c) Equipement nécessaire :

Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1litre (Fig II-12**)** selon la norme française NF EN 12350-7.

d) Conduite de l'essai :

On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau l'aide d'un tube dans le premier robinet. Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0 ٪

On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure II-12: L'aéromètre à mortier.

II.5.2.4. La masse volumique NF EN 12350-6, NA436

a) Principe de l'essai :

Le principe de l'essai est de déterminer le rapport de la masse d'une quantité de mortier ramené à son volume, dans le but de déterminer sa masse volumique. La masse volumique du mortier an été mesurée selon la norme NF EN 12350-6, NA436.

b) Conduite de l'essai :

Mise en place du mortier frais dans une éprouvette cylindrique de volume V et de masse (m1) le mortier et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante ou tige de piquage, après unarasement approprié, Puis pesé l'ensemble (l'éprouvette et le mortier), soit la masse (m2),

$$\delta = M2\text{-}M1/V \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(6)}$$



Figure II-13 : Mesure de la masse volumique du mortier.

II.5.3 ESSAIS REALISE A L'ETAT DURCI

Les essais de caractérisation sur mortier durci sont résumes dans le tableau Suivant :

Essais	Appareil	Dimension (cm)
Compression 7 jrs et 28 jrs	La Presse hydraulique	4x4x16
Traction 7 jrs et 28 jrs		

Tableau II.8 : Les essais de caractérisation sur mortier durci



Figure II-14: essais an l'état durci**.**

a) Essais de compression:

La caractérisation du comportement en compression est effectuée sur des demi-prismes d'éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm mûries à l'eau, conformément à la norme EN 196-1 Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de ruptures et la section transversale de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure (II-15). Si FC est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c=F_c/b^2 \quad \text{.....(7)}$$

R_c: Résistance à la compression en (MPa);
F_c: Charge de rupture en (N);
b: Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

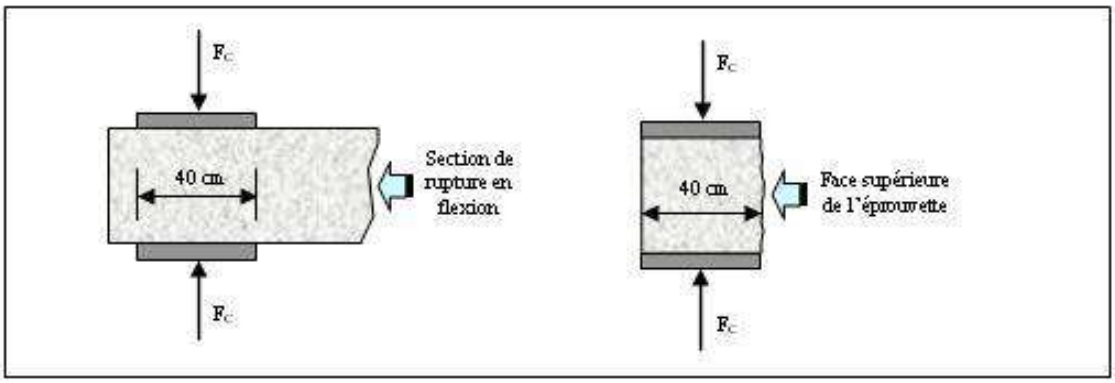


Figure II-15: Essais de compression

La valeur de la contrainte prise en compte sera la moyenne des résultats de trois éprouvettes.

b) Essais de traction par flexion [EN 196-1]

Cet essai est exécuté par une machine désignée pour les tests de flexion sur les éprouvettes de béton de sable ou de mortier 4x4x16. Cm^3

$$Rt = \frac{1\,5\,Ff\quad L}{b^3} \text{..... (8)}$$

Rt: Résistance à la flexion en (MPa);

Ff: Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N);

L:Longueur qui sépare les deux appuis en (mm); b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

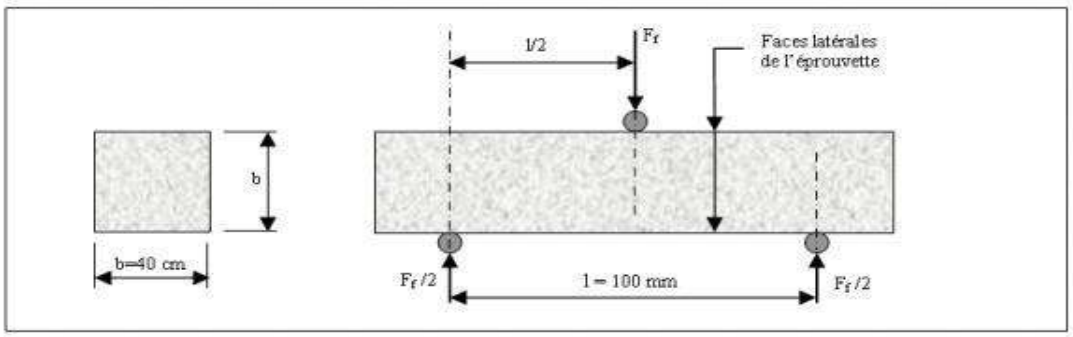


Figure II-16: Essais de traction

III 1. INTRODUCTION

Afin de mettre en évidence les caractéristiques du mortier à base de sable de concassage, notre étude est divisée en trois parties :

- La première partie porte sur les essais physiques préliminaires sur le sable de concassage, à savoir: l'essai de propreté, l'analyse granulométrique, la détermination du taux d'absorption.

- La deuxième partie est consacrée aux mesures des caractéristiques du mortier à l'état frais (l'affaissement, la maniabilité, air occlus).
- La dernière partie porte sur l'étude des résistances du mortier à l'état durci.

La composition du mortier est celle du mortier normalisé (la norme CEN EN 196-1), sauf que le rapport E/C adopté est égal à 0,7.

III. 2 ETUDE PRELIMINAIRE SUR LES SABLES

Avant de procéder aux essais sur le mortier, nous avons effectué des essais physiques sur le sable. Les résultats de ces essais sont représentés dans les tableaux et les graphes suivants:

III. 2.1 PROPRETE DE SABLE

La propreté de sable est déterminée par l'essai d'équivalent de sable conformément à la norme NA46.

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Tableau III.1 : Valeurs d'équivalent de sable.

Catégories de sable		**SC1 (semi-lavé)**	**SR**
Equivalent de sable	**à vu**	88	75
	à piston	83	67

- **Interprétation et discussion**

Le tableau III.1 montre que le sable SC est propre et ne contient que peu de fines, dans ce cas il est préférable de ne l'employer qu'avec des dosages en ciment assez élevés ($C \geq 350$ kg/m3). En ce qui concerne SR qui contient des fines, est un passable sable pour béton.

III. 2.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Le tableau III.2 représente les résultats de l'analyse granulométrique et le module de finesse de sable de concassage et sable roulé selon le pourcentage de fines qu'il contient. La figure 3.1 illustre les courbes granulométriques de ces derniers.

Tableau III.2 : Analyse granulométrique des sables.

Diamètre des tamis (mm)	SC1	SR
	Pourcentage des tamisât cumulés (%)	**Pourcentage des tamisât cumulés (%)**
5	100	100,00
3.15	69.60	
2.50	56.48	
1.60	37.97	
1.25	31.97	
0.800	23.95	99.81
0.630	21.69	92.64
0.400	16.07	79.76
0.315	8.40	20.86
0.250	3.39	11.75
0.160	0.65	4.59
0.125	0.40	1.70
0.100	0.24	1.05
0.080	0.20	0.60
Fond	0	0
Mf	**3.80**	**1.81**

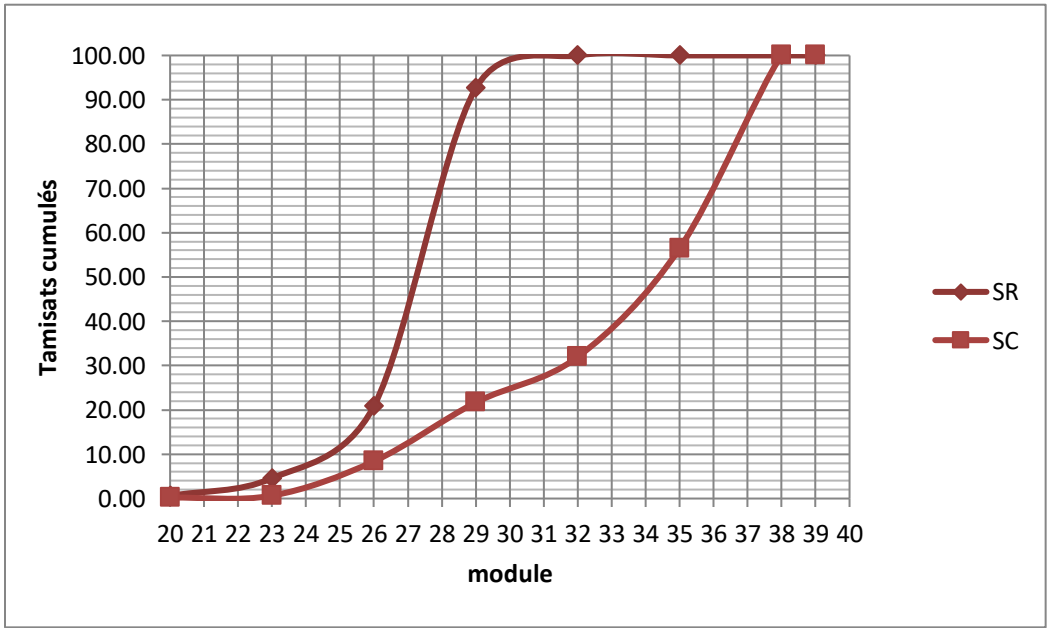


Figure III.1 : Les courbes granulométriques des sables.

- **Interprétation et discussion**

On remarque que les courbes granulométriques des différents sables présentent :

- un sable SC le module de finesse (Mf > 3.2) grossier, mais elles prennent une allure étalée au fur et à mesure que la proportion en teneur de fines augmente. Nous remarquons aussi que la courbe granulométrique est continue c.-à-d que cet échantillon port l'ensemble des catégories de fraction 0.08/3.5 mm.

- SR est très riche de la fraction 0.1/0.4 mm. En revanche, le module de finesse (Mf = 1.8) montre qu'il s'agit d'un sable fin.

III. 2.3 MESURE DE TAUX D'ABSORPTION SELON [NF P18-555]

III. 2.3.1 Mesure du taux d'absorption après 24 heures d'imbibition:

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération.

Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.

On peut vérifier que cet état a été atteint en pla1ant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant.

III. 2.3.2 Mesure du taux d'absorption après 1/2 heure d'imbibition :

Même principe de mesure mentionné mais après imbibition dans l'eau pendant 1/2 heures.
Le tableau suivant représente les valeurs de coefficient d'absorption de différentes catégories de sable.

Tableau III.3 : Coefficient d'absorption de différentes catégories de sable.

Catégories de sable	**SC0** lavée	**SC**1 (5% fines)	**SC2** Imbibé (24 h)	**SC2** Imbibé (30 min)	**SC3** brut	**SR** roulé
Masse saturée (g)	1038,9	1033.5	1035.2	1013	1048	1012,0
Masse sèche (g)	999,0	987.6	983	970.6	988	1000,0
Coefficient d'absorption (%)	**3.99**	**4.65**	**5.31**	**4.36**	**6.07**	**1.2**

- **Interprétation et discussion**

Le tableau III.3 montre que le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines dans le sable. Aussi nous remarquons que le SC absorb presque 80 ٪du pourcentage totale d'absorption seulement pendant les premières 30 min, parce que l'absorption d'eau par le sable est ralentie ou arrêtée.

Pour cette raison, il est souvent plus utile de déterminer la quantité d'eau absorbée au bout de 10 ou 30 minutes plutôt que l'absorption complète d'eau qui, en pratique, ne sera peut-être jamais atteinte. De cette manière, on peut gagner du temps pour la réalisation des essais et en même temps on ajoute la quantité d'eau absorbée réellement et non pas ajoutée à l'eau de gâchage.

III. 2.3.3 Effet des fines sur le taux d'absorption des SCs

Quatre différentes concentrations de fines, allant de 0% à 18% du poids total de sable ont été utilisées avec un sable semi lavé considéré contient 12 % de fines pris comme témoin pour évaluer le taux d'absorption en fonction de leur concentration en fines.

Les résultats obtenus, sont représentés sur la figure III.2 :

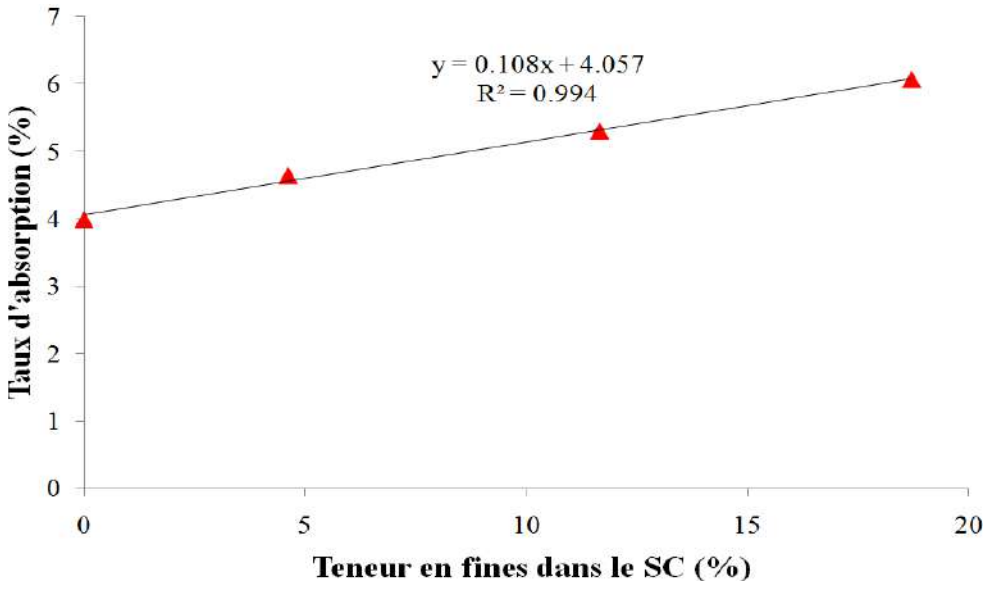


Figure III.2 : l'évolution du taux d'absorption du SC en fonction de sa teneur en fines

Le pourcentage du taux d'absorption en fonction de la concentration en fines est linéaire dans notre cas (Figures : III.2). Plus le pourcentage des fines augmente, plus le taux d'absorption augmente probablement à cause de leur forme qui n'est pas sphérique suite à l'opération de concassage et l'augmentation de la surface spécifique totale de la fraction sableuse.

III. 3 Mesure des propriétés à l'état frais du mortier

L'ouvrabilité ou la maniabilité du mortier peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par la mesure de son affaissement ou son temps d'écoulement. Dans cette partie, on va étudier les principaux paramètres affectant l'état frais du mortier.

III. 3.1 Perte d'ouvrabilité du mortier

Dans ces essais, l'ouvrabilité est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration et la mesure de l'affaissement.

a) **Affaissement :**

La mesure de l'affaissement au mini-cône du mortier est un moyen d'appréciation et de contrôle de la capacité à se mettre en place sous seulement son poids propre. Généralement, le diamètre de la galette de mortier formée sur la plaque après soulèvement du moule conique est mesuré : c'est ce qu'on appelle étalement. S'il s'agit d'un mortier ferme, on mesure alors l'affaissement au niveau du point le plus haut. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures suivantes :

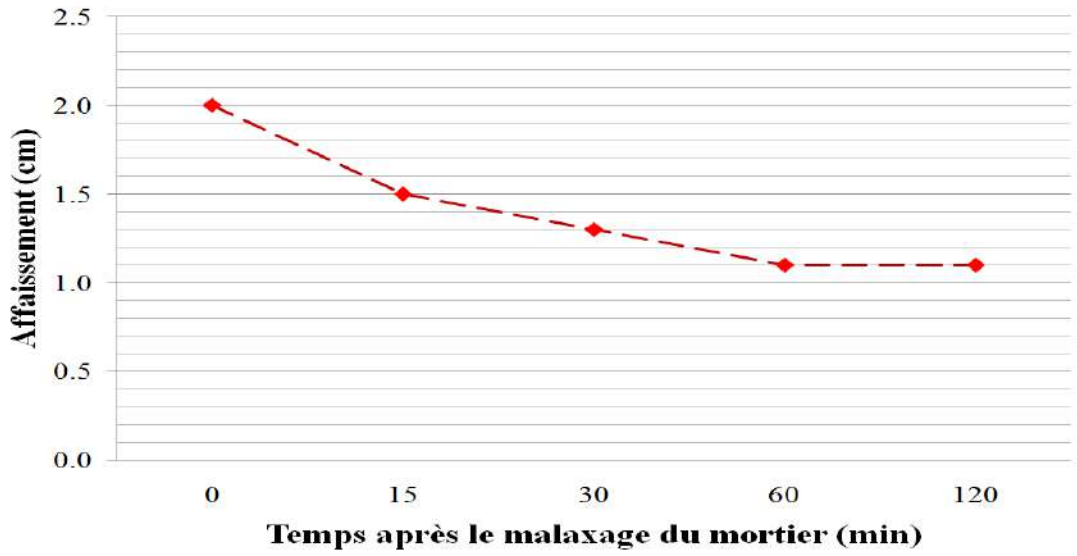


Figure III.3 : Perte d'affaissement du mortier en fonction du temps

- **Interprétation et discussion**

D'après la figure III.3, on constate que l'affaissement diminue avec l'augmentation du temps. C'est-à-dire que le mortier avec le temps perde son seuil d'écoulement et sa viscosité qu'ils sont influés directement par son poids propre. On peut constater que la perte d'ouvrabilité est moins claire dans le cas de mesure d'affaissement que dans la mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre comme il sera montré sur la figure III.4.

b) **Maniabilité :**

Dans cette partie, on va étudier l'effet du temps sur la maniabilité du mortier en mesurant le temps d'écoulement au maniabilimètre B.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure III.4 :

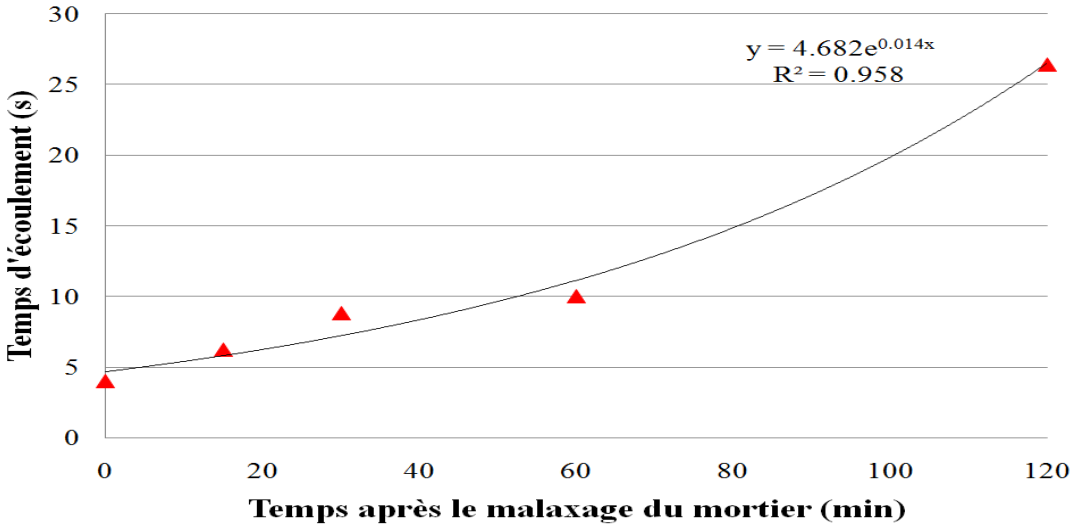


Figure III.4 : Perte de maniabilité du mortier en fonction du temps

On a mesuré la perte d'ouvrabilité du mortier M0SC2 qui contient 12% de fines dans le SC en mesurant le temps d'écoulement à travers le maniabilimètre à 0, 15, 30, 60 et 120 minutes après le malaxage. Il est à noter que la première mesure d'affaissement est prise comme référence (t=0), ainsi qu'on a remalaxé le mortier pendant 15 secondes à petite vitesse juste avant chaque mesure. La figure 3.4 montre que l'ouvrabilité à t=0, qui vaut 4 secondes, est un temps moyen pour un mortier sans adjuvant, cette ouvrabilité diminue en fonction d'augmentation de temps et devient plus grand après 30 min en suivant une loi exponentielle.

Pratiquement, il y a deux phénomènes transitoires distincts pouvant manifester la perte de l'ouvrabilité dans le temps ce sont : la thixotropie (phénomène réversible) et le vieillissement (phénomène irréversible). En ce qui concerne le premier phénomène, un simple malaxage suffisamment vigoureux peut "effacer" les conséquences d'un long temps de repos sur l'état de floculation d'un matériau. Alors qu'aucun malaxage ne peut inverser les réactions physico- chimiques provoquent le vieillissement. Comme le phénomène de thixotropie est réversible, le gain en seuil d'écoulement disparaît suite à un remalaxage suffisant du mortier.

En outre, la présence des fines joue un rôle d'accélérateur de prise. D'après BENNA et DAHLI, un tel résultat a été déjà observé par Nonat en 1994, qui a montré par calorimété que l'hydratation du silicate tricalcique est plus rapide en présence de fines calcaires (les fines agissent comme catalyseur de l'hydratation de 3CaO.SiO3).

III.3.2 Effet du rapport E/C :

Trois rapports E/C (0.50, 0.6 et 0.70) ont été utilisés pour le mortier M0SC1 (S/C=3). Ces rapports ont été choisis de manière à confectionner un mortier dont le temps d'écoulement, l'affaissement et l'air occlus est mesurable, en utilisant le mini-cône d'affaissement, le maniabilimètre et l'aéromètre. La figure suivante illustre les résultats obtenus :

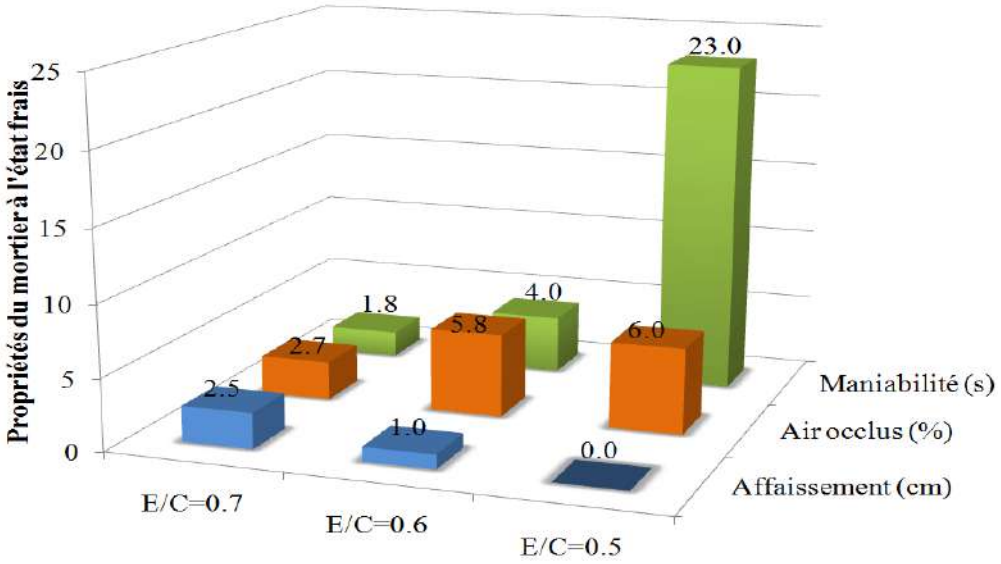


Figure III.5 : Effet du rapport E/C

La figure III.5 montre l'allure d'écoulement du mortier confectionné avec différents rapports E/C.

- Le temps d'écoulement du mortier est inversement proportionnel avec le rapport E/C. On constate que le temps d'écoulement des mortiers et le maximum lorsque le rapport E/C tend vers 0.50. Cependant, l'influence du E/C sur l'évolution du temps d'écoulement est plus remarquable autant que la concentration volumique est plus grande.
- Même observation pour l'affaissement qui tend vers zéro lorsque le rapport E/C tend vers 0.50.
- D'après les résultats trouvés, on remarque que le volume d'air occlus augmente

avec le décroissement du rapport E/C, et on remarque aussi que la teneur en air occlus pour le mortier à E/C = 0.5 et plus grande que la teneur en air pour les autres rapports. Cela explique qu'il est moins compact et plus poreux c-à-d : l'eau supplémentaire occupe le vide entre les constituants du mortier (graine de sable et ciment).

- L'augmentation du rapport E/C conduit à la diminution de la concentration volumique solide totale du mortier, ce qui augmente la viscosité du mélange. Ce qui peut expliquer le ralentissement observé sur l'évolution du temps d'écoulement des mortiers testés.

III.3.3 Effet du taux d'absorption :

Dans cette cas, on a essaie d'avoir étudié l'influence du taux d'absorption sur l'état frais du trois mélange,

M0SC2 : Ab = 5.31 (l'eau est ajoutée au moment de malaxage)

M24SC2 : Ab = 5.31 (le sable est imbibé 24h dans l'eau pour avoir le même pourcentage d'absorption)

M0SC2* : Ab = 4.36 (Ab correspond à 30 min)

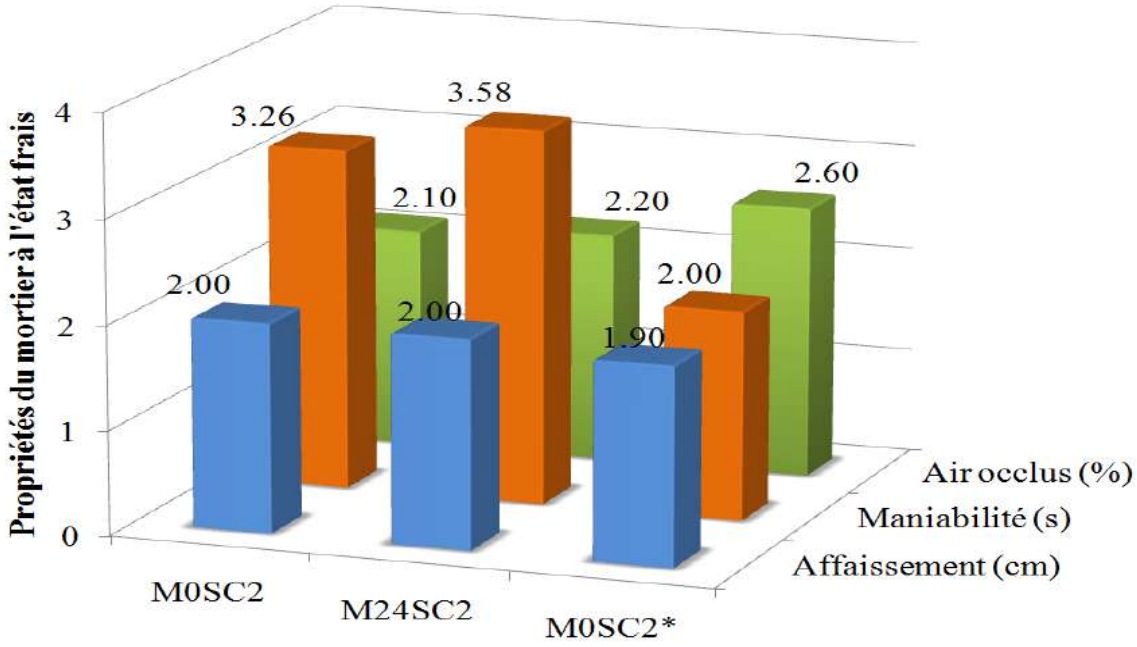


Figure III.6 : Effet du taux d'absorption sur l'état frais du mortier

Les résultats ont indiqué que le SC calcaire utilisé dans cette étude avec une capacité d'absorption entre 4 à 6% en poids.

Il a été constaté que l'absorption de sable dans tous les mélanges de mortier considérés

dans cette étude s'est produite principalement dans les 30 premières minutes après le début du malaxage et a diminué considérablement par la suite. Le taux de perte d'affaissement du mortier était presque identique pour les mélanges avec temps d'absorption différent.

III. 3.4 Comparaison avec le sable roulé (SR) :

Dans cette étape, on va procéder à une comparaison entre deux types de mortier malaxé de même manière et dans les mêmes conditions avec E/C = 0.7 et S/C = 3. L'un avec le SC et l'autre avec SR. La figure suivante illustre les résultats obtenus :

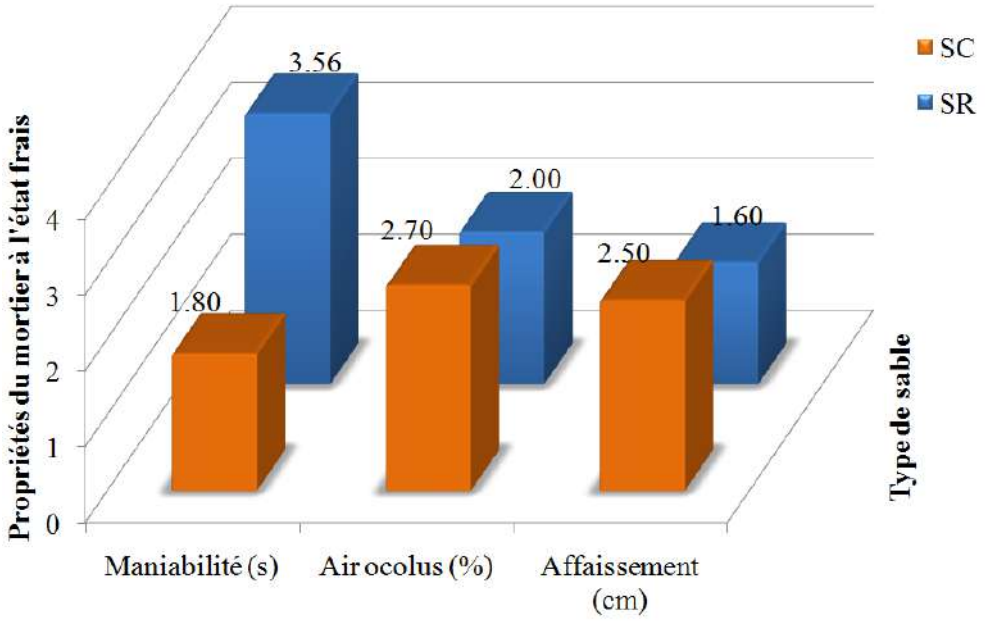


Figure III.7 : Comparaison avec le SR

D'après les résultats obtenus dans la figure précédent, on remarque que:

- L'affaissement de mortier SR est moins que le mortier SC, Ceci est dû au ratio des fines qui a besoin de plus d'eau pendant le malaxage qui rend le mélange plus ouvrable.
- le volume d'air occlus de mortier SR est moins que le mortier SC, Ceci est dû à les caractéristiques physiques du SC, telles que la gradation, la forme, la teneur en fines de concassage et la texture ce qui en fait moins compacité et donc plus volume d'aire par rapport au SR qu'il est en général construire particules roulées de forme régulier et moins de fines.
- Par contre le temps d'écoulement de mortier SR est grand que le mortier SC, Ceci est dû au ratio des fines qui a besoin de plus d'eau pendant le malaxage qui rend le mélange plus ouvrable.

III.4 Mesure de la résistance mécanique du mortier à l'état durci :

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures prisent sur 3 éprouvettes de 4x4x16 cm^3 à l'âge de 7et 28j avec taux d'absorption différent.

III.4.1 Effet du taux d'absorption sur la résistance mécanique :

Dans cette partie, on va faire une comparaison entre les mortiers confectionnés avec les mêmes composants avec la même composition, sauf que l'eau d'absorption ajoutée est mesurée par deux durées de temps différentes (24h - 30 minutes) et la méthode par laquelle on l'ajoute cette quantité est différente (lors de malaxage-après 24h d'imbibition), comme il était montré dans la section III.3.3.

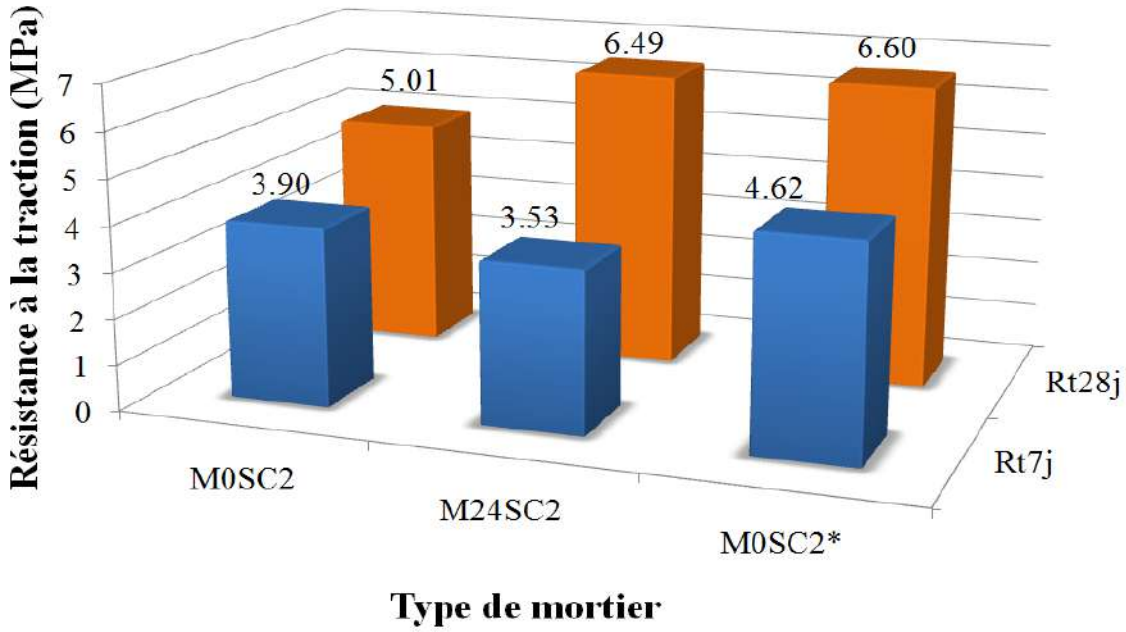


Figure III.8 : Effet du taux d'absorption sur la résistance à la traction

Les résultats ainsi obtenus montrent que la résistance mécanique à la compression du mortier M0SC2 est la plus faible. Ce mortier est confectionné selon la norme en ajoutant la quantité d'eau absorbée, qui a été mesurée après 24 heures d'imbibition, lors du malaxage en utilisant un SC sec. Par contre, le mortier M24SC2, à base d'un SC humide contenant déjà la quantité d'eau absorbée, présente une résistance mécanique plus grande que le mortier M0SC2. Ces deux mortiers ont la même composition et la même quantité d'eau effective. La seule différence se trouve à la manière dont on ajoute la quantité d'eau absorbée. Ce résultat montre que le SC dans le premier cas n'absorbe pas toute la quantité d'eau prévue et calculée expérimentalement selon la norme en vigueur. La quantité d'eau qui reste s'ajoute systématiquement à l'eau libre de gâchage en augmentant le rapport E/C effectif.

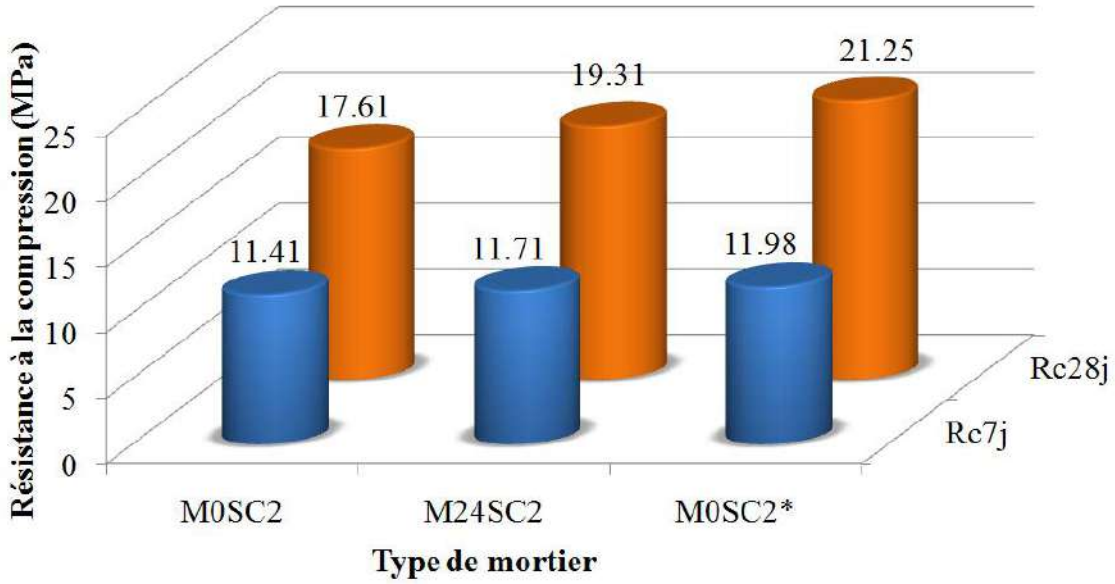


Figure III.9 : Effet du taux d'absorption sur la résistance à la compression

En revanche, l'utilisation de la valeur du taux d'absorption du SC après seulement 30 minutes montre une meilleure résistance que les deux premiers mortiers. Cela est revient au mécanisme de malaxage qui empêche le SC d'absorber toute sa capacité par l'enrobage des grains du SC par la pate de ciment. Donc, il est très utile d'utiliser la valeur du taux d'absorption estimée après 30 minutes que celle après 24 heures.

III.4.2 Effet de la teneur en fines dans le SC sur la résistance mécanique :

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures prisent sur 3 éprouvettes de 4x4x16 cm^3 à l'âge de 7 et 28j avec deux différents teneurs en fine dans le SC (5% et 12%).

La figure III.10 illustre l'évolution de la résistance mécanique du mortier en fonction de la teneur en fines calcaires dans le SC. La mesure de la résistance à la traction et à la compression que l'augmentation des fines calcaires de concassage dans le SC affecte la résistance mécanique du mortier. En effet, il est rapporté dans la littérature qu'il y a deux effets contradictoires des fines de SC sur les propriétés mécaniques de bétons et mortier à savoir : un effet négatif dû à l'augmentation de la demande en eau et donc la diminution de l'ouvrabilité, et un autre effet positif dû au rôle de remplissage pouvant être jouer par les fines en augmentant la densité du mortier et donc les propriétés mécanique. Apparemment, dans notre cas le second effet est dominant, ce qui provoque une diminution de la résistance à la fois à la traction et à la compression.

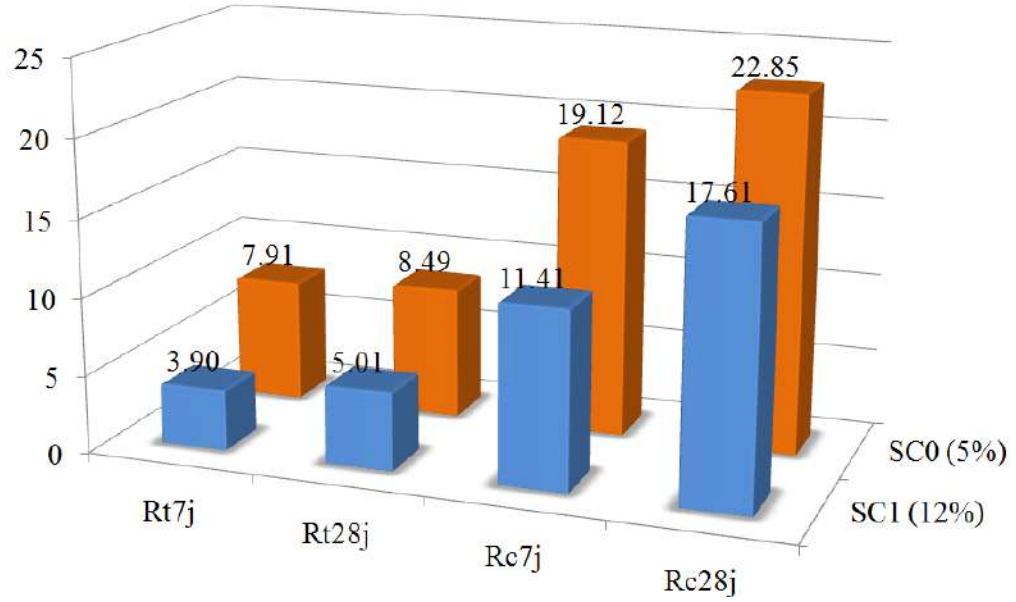


Figure III.10 : Effet de la teneur en fines dans le SC sur la résistance mécanique

Il y a une autre explication possible de cette chute de résistance, c'est la quantité d'eau absorbée prévue pour les deux mortiers. Rappelons que le taux d'absorption mesuré pour le SC2 (12% de fines) présente un taux d'absorption plus grand que celui de SC1 (5% de fines). Et suite au résultat obtenu à la section précédente (III.4.1), la quantité d'eau ajoutée sur la base du taux d'absorption calculé après 24 heures est exagérée. Cette dernière pouvait causer une chute de résistance mécanique du mortier en augmentant le rapport E/C.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce travail présente une continuité des travaux de recherche déjà effectués étudiant les caractéristiques mécaniques et la durabilité du mortier à base de sable de concassage. Il s'agit d'une étape supplémentaire vers la valorisation du sable de concassage et son utilisation dans le domaine du génie civil.

Les résultats d'essai montrent que l'effet du taux d'absorption du sable calcaire de concassage et le pourcentage des fines sur le rapport eau/ciment (E/C) effectif, la résistance et la perte d'affaissement du mortier de ciment est très important.

Sur la base des conditions expérimentales et des résultats obtenus à partir de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- l'évolution du taux d'absorption du SC en fonction de sa teneur en fines est proportionnelle. Elle suit parfaitement un modèle droit avec un coefficient de corrélation presque égal à 1.

- les résultats ainsi obtenus dans ce travail, montrent que le SC n'absorbe pas toute la quantité d'eau calculée par l'essai effectué selon la norme en vigueur. La quantité d'eau qui reste s'ajoute systématiquement à l'eau libre de gâchage en augmentant le rapport E/C effectif. A cet effet, il est très utile d'utiliser la valeur du taux d'absorption estimée après 30 minutes que celle après 24 heures. Puisque l'utilisation de la valeur du taux d'absorption du SC après seulement 30 minutes montre une meilleure résistance que les deux premiers mortiers en conservant pratiquement les mêmes propriétés rhéologiques.

En effet, on a pu répondre partiellement à la question posée au début de notre travail. Il reste à déterminer la valeur exacte du taux d'absorption en utilisant une méthode adéquate à ce type du sable et même au sable recyclé. Cette partie pourra faire l'objet d'un autre sujet pour les futures promotions en génie civil.

Cependant, une étude complémentaire sur le béton est vivement recommandée, qui sera d'un grand intérêt pour la valorisation de sables de concassage et le développement du béton en tant que matériau essentiel et important dans la réalisation des ouvrages d'art et de construction.

RÉFÉRENCES BILIOGRAPHIQUES

[ACI 116, 1985] ACI Committee 116, "Cement and Concrete Terminology," Publication SP-19 (85), Detroit, Michigan, 1985.

[Ahmed, 1989] Ahmed, A.E., and El-Kourd, A.A., "Properties of Concrete Incorporating Natural and Crushed Stone Very Fine Sand," ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 4, July-August, 1989.

[ALHOZAIMY, 2009] A M. ALHOZAIMY, EFFECT OF ABSORPTION OF LIMESTONE AGGREGATES ON STRENGTH AND SLUMP LOSS OF CONCRETE » CEMENT & CONCRETE COMPOSITES 31 (2009) 470–473

[ASTM C 109-95] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C 117-95] Standard Test Method for Materials Finer than 75mm (No.200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing," American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C 117-95] Standard Test Method for Materials Finer than 75µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing," American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C 127] Standard Test for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate," ASTM International.

[ASTM C 128] ASTM C 128-01. "Standard Test for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate," ASTM International.

[ASTM C 128-97] Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate," American Society for Testing and Materials, Annual Book, 1998.

[ASTM C192] ASTM C192. Annual book of ASTM standards, vol. 4.02; 1996. p. 111–8.

[Baker, 1973] Baker, S. D., and C. F. Scholer, "Effect of Variations in Coarse-Aggregate Gradation on Properties of Portland Cement Concrete," Highway Research Record, No.441, Grading of Concrete Aggregates, Highway Research Board, Washington, D. C., 1973.

[Bederina, 2013] Bederina, M., Makhloufi, Z., Bounoua, A., Bouziani, T., &Queneudec, M. (2013). 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, 47, 146-158.

[Benabed, 2012] Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties of self-

compacting mortar made with various types of sand. Cement and Concrete Composites, 34(10), 1167-1173

[Benabed, 2014] Benabed, B., Azzouz, L., Kadri, E. H., Kenai, S., & Belaidi, A. S. E. (2014). Effect of fine aggregate replacement with desert dune sand on fresh properties and strength of self-compacting mortars. Journal of Adhesion Science and Technology, 28(21), 2182-2195.

[Benabed, 2016] Benabed, B., Soualhi, H., Belaidi, A. S. E., Azzouz, L., & Kenai, S. (2016). Effect of limestone powder as a partial replacement of crushed quarry sand on properties of self-compacting repair mortars. Journal of Building Materials and Structures, 3(1), 15-30.

[Benachour, 2008] Benachour, Y., Davy, C. A., Skoczylas, F., &Houari, H. (2008). Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. Cement and Concrete Research, 38(6), 727-736.

[Bonavetti, 1994] Bonavetti, V.L., and Irassar, E.F., "The Effect of Stone Dust Content in Sand," Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 3, pp. 580-590, 1994.

[Bouziani, 2013] Bouziani, T. (2013). Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. Construction and Building Materials, 49, 308-314.

[Celik, 1996] Celik, T., and Marar, K., "Effects of Crushed Stone Dust on Some Properties of Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 26, No.7, pp. 1121-1130, 1996.

[Dolar-Mantuani, 1983] Dolar-Mantuani, Ludmila, "Handbook of Concrete Aggregates," Noyes Publications, New Jersey, 1983.

[Dreux, 1998] G. Dreux et J. Festa : Nouveau guide du béton et de ses constituants. Editions Eyrolles, France, 1998.

[Dukatz, 1985] Dukatz, E.L. and Marek, C.R., "Evaluation of Manufactured Stone Sand for Use in Virginia," Construction Materials Research and Development, Project 11-3.68, Vulcan Materials Company, March, 1985, 39 pp.

[EN 1097-6, 2013] Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption.

[Ezziane, 2010] Ezziane, K., Kadri, E. H., Hallal, A., & Duval, R. (2010). Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method. Materials and structures, 43(3), 393-401.

[Gentilini, 2013] P. Gentilini, V. Delmotte, O. Marzouk, Y. Descantes. Mesure de l'absorption d'eau de sables de béton concassé avec fines. Clôture de l'opération AGREGA Ifsttar (centre de Nantes) - Mardi 10 décembre 2013.

[Guan, 2019] GUAN, Minsheng, LAI, Zhichao, XIAO, Qian, et al. Bond behavior of concrete-filled steel tube columns using manufactured sand (MS-CFT). Engineering Structures, 2019, vol. 187, p. 199-208.
[Guemmadi, 2009] Guemmadi, Z., Resheidat, M., Chabil, H., &Toumi, B. (2009). Modeling the influence of limestone filler on concrete: A novel approach for strength and cost. Jordan Journal of Civil Engineering, 3(2), 158-171.
[Hewlett, 1998] Hewlett, P. C., "Lea's Chemistry of Cement and Concrete," 4th edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.
[Hudson, 1997] Hudson, B.P., "Manufactured Sand – Destroying Some Myths," Quarry, pp. 57-62, October, 1997.
[Hudson, 1997] Hudson, B.P., "Manufactured Sand for Concrete," 5th ICAR Symposium, E2-2-1, Austin, Texas, 1997.
[Hudson, 1997] Hudson, B.P., "Manufactured Sand for Concrete," 5th ICAR Symposium, E2-2-1, Austin, Texas, 1997.
[ICAR, 2001] Nam-Shik Ahn and David W. Fowler: An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate micro fines in Portland cement concrete. Research Report ICAR 102-1F/ Research Project Number ICAR 102. December 2001.
[Karthik, 2017] KARTHIK, S., RAO, P. Ram Mohan, et AWOYERA, P. O. Strength properties of bamboo and steel reinforced concrete containing manufactured sand and mineral admixtures. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2017, vol. 29, no 4, p. 400-406.
[Mahesh, 2018] MAHESH, J., NAGAMANI, K., et JARIN, T. Corrosion of reinforcement in concrete with fly ash and manufactured sand. Materials Research Innovations,2018,p.1-9.
[Malhotra, 1985] Malhotra, V.M., and Carette, G.G., "Performance of Concrete Incorporating Limestone Dust as Partial Replacement for Sand," ACI Journal, Proceedings V. 82, No. 3, pp. 363-371, May-June, 1985.
[McKeagney, 1984] Mckeagney, R.B. Trend To Use More Stone Sand, Conf on Crushed Stone for Road and Street Const and Reconst, Nat Crushed Stone Ass, June 14-15, 1984.
[Menadi, 2009] Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., & Aït-Mokhtar, A. (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. Construction and Building Materials, 23(2), 625-633.
[Mindess, 2003] Mindess S, Young J, Darwin D. Concrete. New Jersey: Prentice-Hall Inc.; 2003. 644 pp.

[Naël-Redolfi, 2018] NAËL-REDOLFI, Jennifer, KEITA, Emmanuel, et ROUSSEL, Nicolas. Water absorption measurement of fine porous aggregates using an evaporative method: Experimental results and physical analysis. Cement and Concrete Research, 2018, vol. 104, p. 61-67.
[NCSA, 1976] National Crushed Stone Association, "Stone Sand for Portland Cement," Concrete Materials, pp. 12, February, 1976.
[Neville, 1995] Neville AM. Properties of concrete. 4th ed. London: Longman Publishing Ltd; 1995. 844 pp.
[NF P 18-555] Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.
[Nichols, 1982] Nichols, F. P., Jr., "Manufactured Sand and Crushed Stone in Portland Cement Concrete," Concrete International, August 1982.
[PCA, 1975] Portland Cement Association. Principles of quality concrete; 1975. 312 pp.
[Pike, 1989] Pike, D. C., "Report to CAB/2 on a project to examine the regulation of fines in sands for concrete and mortar," British Standards Institution, London, 1989.
[Pike, 1992] Pike, D. C., "Methodologies for assessing the variability of fines in sands used for concrete and mortars," PhD thesis, Postgraduate research institute for Sedimentology, University of Reading, UK, 1992.
[Prabhakar, 2019] PRABHAKAR, Arun, SALONITIS, Konstantinos, et JOLLY, Mark. Characterisation of Lead Sheet Manufactured Using Traditional Sand-Casting Technique. In : Shape Casting. Springer, Cham, 2019. p. 283-292.
[Ramirez, 1990] Ramirez, J. L., J. M. Barcena, and J. I. Urreta, "Proposal for Limitation and Control of Fines in Calcareous Sands Based upon Their Influence in Some Concrete Properties," Materials and Structures, Vol.23, 1990.
[Ren, 2019] REN, Qiang, DE SCHUTTER, Geert, JIANG, Zhengwu, et al. Multi-level diffusion model for manufactured sand mortar considering particle shape and limestone powder effects. Construction and Building Materials, 2019, vol. 207, p. 218-227.
[Sadhouari, 2009] Sadhouari,F. ,Goufi,N., Guezzouli.A (2009). Valorisation de l'utilisation des sables concasses paranalyse des propriétés des mortiers et bétons ; SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. ENSET Oran (Algeria).
[Safiddine, 2010] Safiddine, S. (2010). Mesures des caractéristiques rhéologiques et de la réactivité du mortier à base de sable de concassage (Mémoire Magister, Université de Médéa).

[Safiddine, 2017] Safiddine, S., Debieb, F., Kadri, E. H., Menadi, B., & Soualhi, H. (2017). Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar. Applied Rheology, 27(1).
[Safiddine, 2018] Safiddine, Salim. Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques du béton à base de sable de concassage: application au béton pompé. Thèse de doctorat. Université Saad Dahlab de Blida 1 (2018).
[Shen, 2017] SHEN, Weiguo, LIU, Yi, CAO, Lianghong, et al. Mixing design and microstructure of ultra high strength concrete with manufactured sand. Construction and Building Materials, 2017, vol. 143, p. 312-321.
[Shen, 2018] SHEN, Weiguo, LIU, Yi, WANG, Zhongwen, et al. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance. Construction and Building Materials, 2018, vol. 172, p. 574-583.
[Shetty, 1982] Shetty MS. Concrete technology – theory and practice. New Delhi, India: S.Chand & Company Ltd; 1982. 525 pp.
[Tattersall, 1991] Tattersall GH. Workability and quality control of concrete. London: E&FN SPON; 1991. 262 pp.
[Wills, 1967] Wills, M. H. Jr., "How Aggregate Particle Shape Influences Concrete Mixing Water Requirement and Strength," Journal of Materials, vol 2, n 4, pp 101-111, 1967.
[Xiao, 2018] XIAO, Yunfeng, ZHANG, Yaoting, LU, Jiezhi, et al. Experimental analysis on pre-stress friction loss of crushed limestone sand concrete beams. Applied Sciences, 2018, vol. 8, no 5, p. 683.
[Yacoub, 2018] YACOUB, Aiman, DJERBI, Assia, et FEN-CHONG, Teddy. Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing. Construction and Building Materials, 2018, vol. 158, p. 464-471.
[Yang, 2018 a] YANG, Jianhong, YU, Wen, FANG, Huai-ying, et al. Detection of size of manufactured sand particles based on digital image processing. PloS one, 2018, vol. 13, no 12, p. e0206135.
[Yang, 2018 b] YANG, Haifeng, LIANG, Dongyao, DENG, Zhiheng, et al. Effect of limestone powder in manufactured sand on the hydration products and microstructure of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2018, vol. 188, p. 1045-1049.

[Yang, 2019] Yang, R., Yu, R., Shui, Z., Guo, C., Wu, S., Gao, X., & Peng, S. (2019). The

physical and chemical impact of manufactured sand as a partial replacement material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). Cement and Concrete Composites.
[Zhao, 2017] ZHAO, Shunbo, DING, Xinxin, ZHAO, Mingshuang, et al. Experimental study on tensile strength development of concrete with manufactured sand. Construction and Building Materials, 2017, vol. 138, p. 247-253.

Table Des Matières

Page

Résumé
Liste des tableaux
Liste des figures
INTRODUCTION GENERALE **01**

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SABLE DE CONCASSAGE

I.1. Introduction **03**
I.2. Définitions **03**
I.2.1. Sable de concassage **03**
I.2.2. Fines (Poussière) de concassage **03**
I.3. Caractéristiques de sables de concassage **03**
I.3.1. Etat saturé à surface sèche « SSD » **04**
I.3.2. Taux d'absorption **04**
I.3.3. Forme des particules **07**
I.3.4. Texture de la surface des particules **08**
I.3.5. Granulométrie **09**
I.3.6. Teneur en argile et composants nocifs **11**
I.4. L'effet du sable de concassage sur les propriétés du béton frais **12**
I.4.1. Besoin en eau de mélange **12**
I.4.2. Teneur en air **12**
I.5. Effet du sable de concassage sur les propriétés du béton durci **13**
I.5.1. Résistance à la compression **13**
I.5.2. Résistance à la flexion **15**
I.6. Travaux Algériens sur le sable calcaire de concassage **16**
I.7. Travaux algériens sur les fines calcaires de concassage **20**
I.8. Aperçu sur la normalisation du coefficient d'absorption **23**

CHAPITRE II: PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1. Programme expérimental **24**
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés **24**
II.2.1. Le Sable **25**
II.2.2. Le Ciment **26**
II.2.3. L'Eau de gâchage **26**
II.3. Préparation des Matériaux **27**
II.3.1. Prélèvement d'échantillon de sable sur stock **27**
II.3.2. Lavage du sable **27**
II.3.3. Préparation des mélanges **27**
II.3.3.1. Préparation **27**
II.3.3.2. Malaxage **28**
II.4. Description des mélanges et désignation **29**
II.4.1. Le Mortier **29**
II.5. Méthodes d'essais **30**
II.5.1. Essais effectues sur le sable **30**

Page

II.5.1.1. Equivalent de sable **30**
II.5.1.2. Analyse granulométrique **31**
II.5.1.3. Module de finesse **32**
II.5.1.4. Masse volumique **32**
II.5.1.5. Surface spécifique **32**
II.5.1.6. Taux d'absorption des sables **33**
II.5.2. Essais effectués sur les mortiers frais **35**
II.5.2.1. Essai au maniabilimètre **35**
II.5.2.1.a. Objectif de l'essai **35**
II.5.2.1.b. Principe de l'essai **35**
II.5.2.1.c. Equipement nécessaire **35**
II.5.2.1.d. Conduite de l'essai **35**
II.5.2.2. Mesure de l'affaissement **36**
II.5.2.2.a. Principe de l'essai **36**
II.5.2.2.b. Equipement nécessaire **36**
II.5.2.2.c. Conduite de l'essai **36**
II.5.2.3. Essai au air occlus **37**
II.5.2.3.a. Objectif de l'essai **37**
II.5.2.3.b. Principe de l'essai **37**
II.5.2.3.c. Equipement nécessaire **37**
II.5.2.3.d. Conduite de l'essai **37**
II.5.2.4. Essai masse volumique **38**
II.5.2.4.a. Objectif de l'essai **38**
II.5.2.4.b. Principe de l'essai **38**
II.5.3. Essais effectués sur les mortiers durcis **39**
II.5.3.1. Essai a la compression **39**
II.5.3.2. Essai a la flexion **40**

CHAPITRE III: ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

III.1. Introduction **41**
III.2. Etude préliminaire sur les sables **41**
III.2.1. Propreté de sable **41**
III.2.2. Analyse granulométrique **42**
III.2.3. Mesure de coefficient d'absorption **43**
III.2.3.1. Mesure du taux d'absorption après 24 heures d'imbibition **43**
III.2.3.2. Mesure du taux d'absorption après 1/2 heures d'imbibition **43**
III.2.3.3. Cas des suspensions des fines (le fluide de référence) **44**
III.3. Mesure des propriétés à l'état frais du mortier **45**
III.3.1. Perte d'ouvrabilité du mortier **45**
III.3.1.1. affaissement **45**
III.3.1.2. maniabilité **46**
III.3.2. Effet du rapport E/C **47**
III.3.3. Effet du taux d'absorption **48**
III.3.4. Comparaison avec le SR **49**
III.4. Mesure de la résistance mécanique du mortier à l'état durci **50**
III.4.1. Effet du taux d'absorption sur la résistance mécanique **50**
III.4.2. Effet de la teneur en fines dans le SC sur la résistance mécanique **51**
CONCLUSION GENERALE **53**
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **54**