REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème

Effet de la méthode d'incorporation des fines calcaires sur l'ouvrabilité et la résistance du mortier de ciment

---

Présenté par

TAOUTI Farouk

LAREDJ Hamza El Amine

Dirigé par

Dr. SAFIDDINE Salim

Promotion Juin 2022

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage et de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leur encouragement pendant toute la vie, et qui vont continuer à nous aider dans tous les projets de l'avenir, ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profond remerciement à notre promoteur, Dr. SAFIDDINE Salim, pour l'encadrement de ce mémoire, son aide, sa patience et sa confiance qu'il nous a accordés. Nous tenons à remercier aussi les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie Civil de l'université de Médéa, et les enseignants qui ont participé à notre formation.

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

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à :

Tous ceux qui m'ont soutenu dans mon parcours, commençant par les personnes les plus précieuses qui j'ai, mes chers parents qui ont tout sacrifié et n'ont rien retenu afin de m'aider à atteindre ou je suis aujourd'hui, sans eux, tout cela n'aurait pas été possible.

Je veux aussi le dédier à mes frères Mohamed, Aissa et Mokhtar et mes sœurs Asma et Hafida, pour tous les ennuis que je leur ai donnés et tout le soutien que j'ai obtenu en retour. Et à tous les membres de la famille.

A tous mes amis proches avec qui j'ai passé les meilleurs moments de ma vie et qui étaient toujours là dans mes pires moments aussi, avec eux tout ira bien à la fin, Tarek, Nounou, Mosfa,Sidali et Aymen, ainsi que Riad, Mourad, Sofiane et sans oublier mes sœurs Rania , Bouchra et Chahrazed.

A tous mes collègues de classe, a Rahim, a Raounak et Razika, et Hamza amine qui n'est pas seulement mon binôme mais mon proche ami, mon frère même avec qui j'ai passé mes années universitaires par le meilleur et le pire.

Et finalement pour tous ceux que j'ai omis de mentionné, tous ceux qui ont contribué de prés et de loin qui me sont chers.

FAROUK.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux être les plus chères pour moi :

A ma mère et mon père qui étaient toujours à mes cotés et qui m'a toujours soutenue tout au long de ces années d'études, que j'ai pu accomplir avec succès.

A mes frère : Toufik, Bilal Hocine, Faïçal.

A ma sœur, Souad.

A toute la famille : LAREDJ, et à toute la famille DAHMANI

A tous mes amis(es) : Ninou, Abdenour, Nadji, Farouk, Sid-ali, Aymen, Omar …

A toute la promotion de Génie Civil 2022.

HAMZA EL AMINE

ملخص

يوفر استخدام الأحجار الجيرية الرملية الناعمة كبديل للأسمنت البورتلاندي أو الرمل مزايا اقتصادية وبيئية لا يمكن إنكارها. ومع ذلك ، فإن الأدبيات تظهر نتائج مختلفة حول تأثير هذه الأحجار الجيرية الرملية الناعمة على أداء المواد الأسمنتية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير طريقة دمج الحجر الجيري الناعم على خصائص ملاط الأسمنت في الحالة الطازجة والمتصلبة. لهذا الغرض ، تم إنتاج سبع سلاسل مختلفة من ملاط الأسمنت من خلال اعتماد بروتوكولات تجريبية مختلفة.

بينت النتائج المتحصل عليها أن تغيير طريقة الدمج الدقيق يؤثر على الخصائص الريولوجية والميكانيكية للملاط. كان التأثير الكيميائي واضحًا في 7 أيام من خلال تحسين القوة الميكانيكية. من ناحية أخرى ، أدى تأثير التخفيف الخاص بهم إلى انخفاض مقاومة الانضغاط عند 28 يومًا. وبالتالي ، فإن طريقة الحصول على هذه الأحجار الجيرية الرملية الناعمة تؤثر أيضًا على أداء الملاط الذي تم الحصول عليه. تؤدي نظافة الحبيبات التي يتم الحصول عليها من خلال الطحن المباشر للرمل المسحوق المغسول إلى تحسين الخواص الميكانيكية وقابلية التشكل لملاط الأسمنت

الكلمات المفتاحية: حجر جيري ناعم ، ملاط الأسمنت ، قابلية التشكل ، هبوط ، مقاومة ميكانيكية

Résumé

L'utilisation des fines calcaires de sable concassage comme substitution au ciment Portland ou au sable offre des avantages économiques et environnementaux incontestables. Cependant, la littérature montre des résultats différents sur l'effet de ces fines sur les performances des matériaux cimentaires. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence de la méthode d'incorporation des fines calcaires sur les propriétés du mortier de ciment à l'état frais et durci. A cet effet, on a réalisé sept séries différentes de mortiers en adoptant différents protocoles expérimentaux.

Les résultats obtenus montrent que le changement de la méthode d'incorporation des fines affecte les propriétés rhéologiques et mécaniques du mortier. Leur effet de nucléation était clair à 7 jours en améliorant la résistance mécanique. Par contre, leur effet de dilution a conduit à une diminution de la résistance à la compression à 28 jours. Ainsi, la méthode d'obtention de ces fines influe également les performances du mortier obtenu. La propreté de fines obtenues par broyage direct du sable concassé lavé, induit une amélioration à la fois des propriétés mécanique et de l'ouvrabilité du mortier de ciment.

Mots clés : Fines calcaires, Mortier, Ouvrabilité, Affaissement, Résistance mécanique.

Abstract

The use of limestone fine crushed sand as a substitute for Portland cement or sand offers undeniable economic and environmental advantages. However, the literature shows different results on the effect of these fines on the performance of cementitious materials. The main objective of this work is to study the influence of the method of incorporation of fine limestone on the properties of cement mortar in the fresh and hardened state. For this purpose, seven different series of mortars were produced by adopting different experimental protocols.

The results obtained show that changing the fines incorporation method affects the rheological and mechanical properties of the mortar. Their nucleation effect was clear at 7 days by improving mechanical strength. On the other hand, their dilution effect led to a decrease in the compressive strength at 28 days. Thus, the method of obtaining these fines also influences the performance of the mortar obtained. The cleanness of the fines obtained by direct grinding of the washed crushed sand leads to an improvement in both the mechanical properties and the workability of the cement mortar.

Keywords: Fine limestone, Mortar, Workability, Subsidence, Mechanical resistance.

TABLE DES MATIERES

Remerciements
Dédicaces
Résumé
Sommaire
Liste des Figures
Liste des Tableaux
Symboles et Abréviations
Introduction générale 01

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1 Introduction ……...……. 03
I.2 Historique de l'utilisation des fines calcaires dans le béton…….. 03
I.3 Fines calcaires de concassage …….……. 03
I.4 Effets de fillers sur les propriétés des matériaux cimentaires …… 04
I.4.1 Effets physiques …….……..... 05
I.4.1.1 Effet de dilution …….. 05
I.4.1.2 Effet de cisaillement……..…….. 05
I.4.1.3 Effet de compacité des particules ……..……. 06
I.4.2 Effets chimique…… 07
I.4.2.1 Nucléation de C-S-H sur une surface riche en Ca……..……. 07
I.4.2.2 Accélération de la réaction C_3S …… 08
I.4.2.3 Impact sur l'assemblage des phases ……..... 09
I.5 Facteurs régissant les caractéristiques d'hydratation des liants composites à base de calcaire …… 12
I.5.1 Taille des particules de calcaire …..…….. 13

I.5.2 Dosage du calcaire …… 15
I.5.3 Ajout de gypse ……. 16
I.5.4 Caractéristiques des matériaux cimentaires supplémentaires …….. 16
I.5.5 Température de durcissement…… 17
I.6 Travaux algériens sur les fines calcaires de concassage …… 17
I.7 Conclusion …… 20

Chapitre II: Protocole experimental

II.1. Introduction…….. ……... 22
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés ……...…….. 22
II.2.1. Le Sable …… 22
II.2.2. Le Ciment ……. 23
II.2.3. Les fines calcaires ……..…… 24
II.2.4. l'adjuvant ...……..……..…… 24
II.2.5. l'eau de gâchage ...……..…… 25
II.3. Préparation des Matériaux ……..... 25
II.3.1. Lavage du sable …….. 25
II.3.2. Préparation des mélanges ……... 26
II.4. Description des mélanges et désignation ...……. 27
II.4.1. Le Mortier …….. 27
II.5. Méthodes d'essais ……..……..……. 28
II.5.1 Essais effectues sur le sable ……..……. 29
II.5.1.1. Equivalent de sable ……..……... 29
II.5.1.2. Analyse granulométrique…….…… 29
II.5.1.3. Module de finesse…….……... 32
II.5.1.4. Masse volumique …….……..…. 32
II.5.1.5. Surface spécifique……... …..…… 33
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

1) Objectif de l'essai ……...…….. 35
2) Principe de l'essai ……..……...…… 35
3) Equipement nécessaire ……..……. 35
4) Conduite de l'essai …….…….. 35
II.5.2.2. Mesure de l'affaissement …….. 36
1) Principe de l'essai …… 36
2) Equipement nécessaire …… 36
3) Conduite de l'essai ……...…… 36
II.5.3. Essai réalisés l'état durci ……..…….……. 37
II.5.3.1.Essai de compression…… 37
II.5.3.2.Essais de traction par flexion…….……...…… 38

Chapitre III : Résultats et interprétation

III.1Introduction..……..... 39
III.2 Etude préliminaire sur les sables et fines calcaires de concassage …… 39
III.2.1 Propreté de sable …….. 39
III.2.2 Mesure du taux d'absorption du sable de concassage …….. ….... 40
III.3 Effet des fines sur les différentes séries des mortiers à l'état frais et durcis..... 41
III.3.1 Effet de la substitution du sable avec les fines (série I) ……..……..... 41
III.3.1.1 Etat frais …… 41
III.3.1.2 Etat durci ……..... 42
III.3.2 Effet de la substitution de ciment avec les fines (série II)…… 44
III.3.2.1 Etat frais ……..... 44
III.3.2.2 Etat durci ……..... 45
III.3.3 Effet de l'absorption du sable (série III)…….46
III.3.3.1 Etat frais……..... 46
III.3.3.2 Etat durci.……...…….....47
III.3.4 Effet de la substitution volumique (série IV)…….....49
III.3.4.1 Etat frais…….....49
III.3.4.2 Etat durci.……...50
III.3.5 Effet de l'ajout du superplastifiant (série V)..…….....51

III.3.5.1 Etat frais..... 51
III.3.5.2 Etat durci…….....52
III.3.6 Effet de la substitution du sable avec les fines Broyées (série VI)…….. …..54
III.3.6.1 Etat frais…….....54
III.3.6.2 Etat durci…….....55
III.3.7 Effet de la série VII……. ……56
III.3.7.1 Etat frais……..... ……..56
III.3.7.2 Etat durci…….....56

Conclusion générale…….58
Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Synthèse des publications sur les fines calcaires dans le ciment. a) …….. 03
croissance de la littérature b) répartition des domaines thématiques

Figure I.2 : Classification de la contribution du calcaire à l'hydratation des……. 05
systèmes cimentaires composites

Figure I.3 : Pour une vitesse de mélange constante, le taux de cisaillement……. 06
augmente en raison de la réduction de la distance entre les particules où la contrainte est appliquée.

Figure I.4 : Schéma de la répartition des particules après mélange pour …….. 07
un système 100 % ciment Portland (à gauche) et avec 40 % de filler (à droite).

Figure 1.5 : Image MEB montrant la nucléation sur des grains de calcaire pour un mélange de 08
60 % d'alite (C3S) et de 40 % de calcaire (L)

Figure I.6 : Quantité relative de phases hydratées d'un mélange modèle hydraté composé de.... 11
C3A, de portlandite et avec un rapport de sulfate fixe (SO_3/Al_2O_3=1) en fonction de l'évolution des rapports de carbonate (CO_2/Al_2O_3) à 25 °C (quantité totale constante de solides, $C_3A+CaSO_4+CH+Cc$ = 3,25 mol, mis à réagir avec 500 g d'eau ; les données sont exprimées en unités molaires)

Figure I.7 : Taux de chaleur des systèmes de liant binaire et ternaire. FA30 et FA45 sont des… 12
mélanges liants avec des cendres volantes à 30% et 45% de substitution s et FAF30LS10 et FAF25LS15 sont des mélanges ternaires avec 10% et 15% de calcaire

Figure I.8 : : Courbes granulométriques des fines calcaires de qualité laboratoire et de deux… 14
autres utilisées comme fillers dans la production de ciment

Chapitre II

Figure II.1 : Un sable lavé (0% fines)…… 23

Figure II.2 : L'adjuvant utilisé : Medaflow 30 (Superplastifiant)……. 25

Figure II.3: de sable et récupération des fines à travers le tamis 80 μm…… 25

Figure II.4 : Le malaxeur utilisé…….. 27

Figure II.5 : : Essai d'équivalent de sable……..... 29

Figure II.6 : Tamiseuse électrique ……..... 30

Figure II.7 : Les courbes granulométriques de différentes catégories de sable…… 32

Figure II.8 : mesure de la masse volumique ……..... 33

Figure II.9 : Détermination de la surface spécifique……..…..... 33

Figure II.10 : Les étapes de détermination du coefficient d'absorption.……..... 34

Figure II.11 : Le Maniabilimètre..…….. 35

Figure II.12 : l'essai d'affaissement pour le mortier …… 37

Figure II.13 : Essais de compression.……...……..... 38

Figure II.14 : Essais en flexion.…… 38

Chapitre III

Figure III.1 : L'évolution du taux d'absorption en fonction de sa teneur en fines…….. 41

Figure III.2 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des fines..... 42

Figure III.3 : Résistance relative à la compression des mortiers en fonction …… 43
de pourcentage des fines calcaires.

Figure III.4 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de pourcentage …… 44
des fines calcaires.

Figure III.5 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des fines....……. 44

Figure III.6 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression…….. 45

Figure III.7 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la flexion…….. 46

Figure III.8 : Variation de l'affaissement de deux séries I et IV…….. 47
des mortiers en fonction du pourcentage des fines.

Figure III.9 : Variation de la résistance à la compression : a) à 7 jours et b)…… 48
à 28 jours de deux séries (I et III) en fonction de pourcentage des fines.

Figure III.10 : Variation de la résistance à la flexion de deux séries …… 48

(I et III) en fonction de pourcentage des fines à l'âge de 7 et 28 jours.
Figure III.11 : Variation de l'affaissement de deux séries (II et IV) ……. 49
des mortiers en fonction du pourcentage des fines.
Figure III.12 : Variation de la résistance à la compression de deux séries……. 50
(II et IV) en fonction de pourcentage des fines à l'âge de 7 et 28 jours.
Figure III.13 : Variation de la résistance à la flexion de deux séries (II et IV)…….. 50
en fonction de pourcentage des fines à l'âge de 7 et 28 jours.
Figure III.14 : Variation de l'affaissement de deux séries des mortiers……. 51
(II et V) en fonction du pourcentage des fines.
Figure III.15 : L'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre de deux ……. 51
mortiers : sans Sp (M3P5S) et avec Sp (M°3P5S).
Figure III.16 : Variation de la résistance à la compression : a) à 7 jours et b)……. 52
à 28 jours de deux séries (II et V) en fonction de pourcentage des fines.
Figure III.17 : Variation de la résistance à la flexion : a) à 7 jours et b) à 28 jours …… 53
de deux séries (II et V) en fonction de pourcentage des fines.
Figure III.18 : Variation de l'affaissement de mortier en fonction …….. 54
du pourcentage des fines broyées directement du sable concassé
Figure III.19 : Variation de la résistance à la compression : a) à 7 jours et b) à 28 jours …… 55
de deux séries (I et VI) en fonction de pourcentage des fines dans le sable.
Figure III.20 : Variation de la résistance à la flexion : a) à 7 jours et b) à 28 jours ……. 55
de deux séries (I et VI) en fonction de pourcentage des fines.
Figure III.21 : Variation de l'affaissement de mortier en fonction…… 56
du taux d'absorption du sable.
Figure III.22 : Variation de la résistance à la compression à 28 et à 7 jours…… 57
de mortiers en fonction du taux d'absorption du sable.
Figure III.23 : Variation de la résistance à la flexion à 28 et à 7 jours …… 57
de mortiers en fonction du taux d'absorption du sable.
Figure III.24 : Déduction du taux d'absorption du sable de concassage……. 57
à partir de la résistance mécanique à la compression.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 Effet des fines calcaires sur l'hydratation du ciment …… 15

Chapitre II

Tableau II.1 Analyses chimiques du sable utilisé …..……. 22
Tableau II.2 Analyses chimiques du ciment ……..……. 23
Tableau II.3 Composition minéralogique du clinker …..…..……. 23
Tableau II.4 Propriétés physiques du ciment ……..…..…… 24
Tableau II.5 Résistance à la compression ……..…….. 24
Tableau II.6 Récapitulation des opérations de malaxage...…….. 26
Tableau II.7 Composition des mortiers confectionnés.…… 28
Tableau II.8 Analyse granulométrique du sable concassé.…… 31
Tableau II.9 Les essais de caractérisation sur mortier durci …….…… 37

Chapitre III

Tableau III.1 Valeurs d'équivalent de sable.……. 39
Tableau III.2 Coefficient d'absorption expérimentalement mesuré.…… 40
Tableau III.3 Coefficient d'absorption obtenu par régression linéaire…… 40

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Ab	Absorption (%)
d	La plus petite dimension des grains (mm) La
D	plus grande dimension des grains (mm)
FC	Fines calcaires
SCM	Matériaux cimentaires supplémentaires
C	Ciment
E/L	Rapport Eau /Liant
E/C	Rapport Eau/Ciment
S	Sable
SC	Coulis de ciment
M_0	Mortier référence (sans fines de calcaires)
M*f*	Module de finesse
MH	masse de l'échantillon sec après passage a l'étuve a 105 °C
ES	Equivalent du sable
SSB	Surface spécifique de Blaine
MH	Mortier Humide
MAb	Mortier du Absorption (%)
M1	Mortier avec 1% d'ajout d'eau
M2	Mortier du 2% d'ajout d'eau
M3	Mortier du 3% d'ajout d'eau
Rf	Résistance à la flexion en (MPa)
Rc	Résistance à la compression en (MPa)
SP	Superplastifiant
FCBDS	Fines calcaires broyées directement du sable concassé lavé

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nombreuses stratégies visant à réduire les émissions anthropiques de CO_2 associées à la production de clinker ont été proposées dans le monde. Certaines de ces stratégies comprennent l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours, les matières premières et les nouveaux clinkers alternatifs, l'amélioration de l'efficacité du broyage ainsi que la substitution du clinker par des matériaux cimentaires supplémentaires (MCS). Parmi ces stratégies, la substitution du clinker a un potentiel majeur dans la réduction des émissions totales en CO_2 pour réaliser une transition durable, notamment avec l'accroissement enregistré dans la consommation du ciment.

En revanche, les fines calcaires (FC) ne nécessitent que de l'énergie pour l'extraction et le broyage, en comparaison avec le clinker et les MCS, tels que : le laitier de hauts fourneaux, la fumée de silice et les cendres volantes. Les FC peuvent être considérées comme un ajout minéral précieux d'un point de vue technique, environnemental et économique. Leur utilisation présente un avantage inhérent dans le monde entier en raison de sa disponibilité presque partout. En effet, il s'agit d'un élément clé des matériaux durables avec moins d'émissions de CO_2. Elles sont maintenant largement approuvées pour améliorer les propriétés des bétons utilisés en génie civil pour diverses applications. Habituellement, les FC complètent la carence de la distribution granulométrique du ciment. Ce qui peut améliorer à la fois la maniabilité et la stabilité du béton frais. Dans la pratique actuelle, la plupart des normes internationales autorisent l'utilisation de 5 à 35% de calcaire comme ajout minéral visant l'amélioration de performances. L'ajout de calcaire a fait l'objet de débats dans la communauté des chercheurs en ce qui concerne son utilisation en tant que matériau de remplissage inerte ou composant réactif. Récemment, il y a eu un changement considérable d'approche pour augmenter la quantité de FC comme substitut du ciment afin d'explorer son potentiel chimique et sa réactivité.

Expérimentalement, plusieurs facteurs peuvent conduire à des résultats différents voire parfois contradictoires avec en utilisant le même MCS. Si on accepte que la nature des MCS, leur finesse, leur granulométrie, leur forme et texture et même leur provenance puissent influer sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des produits cimentaires à

base de MCS. La question qui se pose maintenant, est-ce que le mode opératoire peut aussi conduire à des résultats contradictoires en utilisant le même MCS ?

L'objectif principal de cette étude est de répondre à cette question en mesurant l'influence des FC proviennent du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du mortier de ciment, incorporées dans le mélange par différentes méthodes peuvent être adoptées comme protocole expérimental par les différents chercheurs travaillant sur ce sujet.

Dans ce manuscrit, la littérature existante est classée selon les caractéristiques de performance pertinentes avec une analyse critique des mécanismes d'interaction et des contradictions présentes dans le domaine. On va tenter de résumer l'étude sous les principales parties suivantes :

Après une introduction générale, ce manuscrit contient trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à une synthèse bibliographique sur l'influence des fines calcaires sur les propriétés des matériaux cimentaires. Le deuxième chapitre s'attache à présenter le programme expérimental, les matériaux et les équipements nécessaires adoptés dans ce travail. Le troisième chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus. A la fin, nous clôturons ce travail par les conclusions les plus importantes et les perspectives pour un éventuel approfondissement de cette étude.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

L'utilisation des fines calcaires (FC) comme ajout minéral dans le ciment connait une croissance rapide pendant les dernières années dans la communauté de chercheurs en matériaux cimentaires supplémentaires (SCM). Ce type d'ajout est l'un des matériaux minéraux le plus utilisé dans le béton en raison de sa grande disponibilité et de son faible coût. Ce chapitre présente les effets du FC sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Ces effets sont principalement influencés par de nombreux facteurs, notamment la taille, la teneur en FC et le protocole expérimental utilisé.

I.2 Historique de l'utilisation des fines calcaires dans le béton

L'intérêt croissant de l'utilisation des FC dans les ciments composites est clair selon le nombre croissant de la littérature mondiale sur les ciments composites à base de calcaire, comme présenté dans la Figure I.1. Ceci est dû au potentiel de la substitution du clinker d'accueillir une contribution d'environ 37 % à la réduction des émissions totales de CO_2 pour réaliser une transition durable vers un scénario de contrôle des émissions à 2 °C d'ici 2050 [WBCSD, 2018]. Le faible facteur d'émission du calcaire, près de 0,008 kg de CO_2 par kg, en fait un choix durable pour réduire les émissions dans les matériaux cimentaires en augmentant modérément et judicieusement le niveau de substitution des FC [Palm et al., 2016].

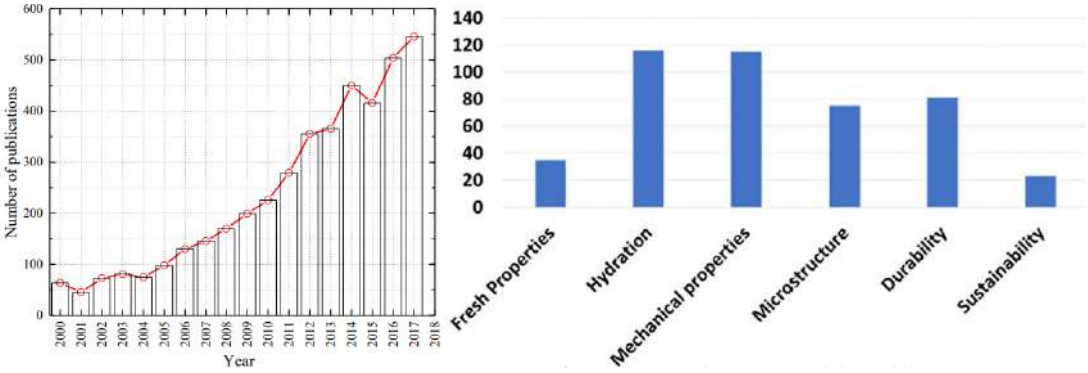


Figure I.1 : Synthèse des publications sur les fines calcaires dans le ciment. a) croissance de la littérature b) répartition des domaines thématiques (Extrait de [Cao et al., 2019] et [Dhandapani et al., 2021]).

I.3 Fines calcaires de concassage

Les fines calcaires sont concassées et broyées à partir de calcaire naturel. La poudre de calcite, de marbre ou de dolomie peuvent toutes considérées comme FC. En revanche, [Andrej, 2006] est le premier qui a distingué le calcaire de la dolomie en tant que roche

sédimentaire. Le calcaire est principalement composé de fragments d'organismes squelettiques. La calcite, l'aragonite, la vatérite et le carbonate de calcium amorphe sont les formes disponibles de la composition minérale du calcaire. Le calcaire peut être formé à partir d'organismes marins, d'environnements lacustres et de dépôts d'évaporites [Wang et al., 2018]. Il peut également être formé par précipitation chimique de calcite ou d'aragonite. Selon la méthode de formation, les grains de FC peuvent être cristallins, clastiques, granuleux ou massifs.

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 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 80 µm, 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].

Par ailleurs, 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 Effets de fillers sur les propriétés des matériaux cimentaires

La littérature montre de fortes ambiguïtés sur les apports des FC et le mécanisme d'influence en fonction des composants du liant et leurs caractéristiques physiques. Les interactions peuvent être largement classées sous les deux grands axes : effets physiques et chimiques, comme indiqué sur la Figure I.2. Ces deux grandes classifications suggérées contiennent également les principaux mécanismes du calcaire : compacité des particules, effets de nucléation, dilution et réaction chimique, comme discuté par Tennis et al. [Tennis et al., 2011] et Wang et al. [Wang et al., 2018a].

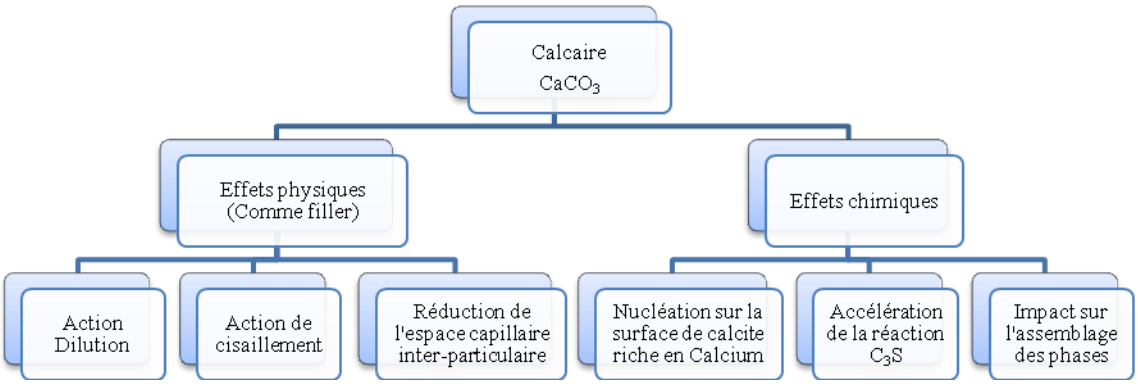


Figure I.2 : Classification de la contribution du calcaire à l'hydratation des systèmes cimentaires composites (Extrait de [Dhandapani et al., 2021]).

I.4.1 Effets physiques

La présence physique des FC a trois impacts majeurs : action de remplissage par dilution, action de cisaillement et effet de compacité des particules.

I.4.1.1 Effet de dilution

Les fillers sont des matériaux inertes (généralement moins réactifs) utilisés pour remplacer les matériaux cimentaires dans le liant [Damineli et al., 2018]. Les fillers typiques sont le quartz fin, les fines calcaires, les dolomites, les cendres de qualité inférieure telles que les cendres résiduelles et peuvent inclure une partie non réactive du SCM (comme le quartz et les composés à base de fer, etc.) [Barsi et al., 2020]. Comme les fillers restent non réactifs, la substitution d'une grande partie du clinker par du filler conduit à une réduction du constituant réactif du liant. Cela entraîne une dilution, c'est-à-dire une moindre accumulation d'hydrates dans le milieu de cimentation et réduit les propriétés des systèmes cimentaires [Kakali et al., 2000]. Cependant, les fillers plus fins sont couramment identifiés pour améliorer le processus d'hydratation précoce. Une étude sur les caractéristiques d'hydratation avec du quartz et du calcaire a révélé que le flux de chaleur au pic et la pente du régime d'accélération peuvent être expliqués par la surface supplémentaire. La contribution de remplissage du calcaire s'est avérée plus efficace que le quartz [Oey et al., 2013]. Profitant de l'intervention précoce provoquée par les fillers, l'utilisation prudent du rapport eau/liant (E/L) s'est avérée empêcher la dilution à des âges plus avancés [Bonavetti et al., 2003].

I.4.1.2 Effet de cisaillement

L'action de cisaillement du filler pourrait activer des sites supplémentaires sur les grains de ciment. Cela peut accélérer la vitesse de réaction en cisaillant la particule en raison de la formation de surfaces pour la nucléation et la réaction [Poppe et Schutter, 2005]. Les courbes

d'hydratation décalées en présence de calcaire fin ou de quartz se sont avérées avoir un effet similaire à celui des courbes d'hydratation d'une pâte préparée avec différents taux de cisaillement (Figure I.3) [Berodier et Scrivener, 2014]. Cet effet sera présent pour tout type de filler, quartz ou calcaire, et peut avoir une influence majeure sur l'hydratation précoce, quelles que soient les caractéristiques du filler telles que la dureté, la taille des particules et le processus de mélange [Berodier et Scrivener, 2014]

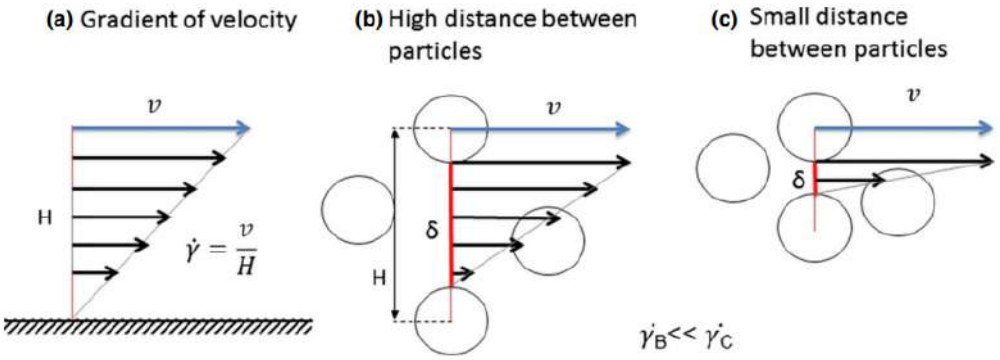


Figure I.3 : Pour une vitesse de mélange constante, le taux de cisaillement augmente en raison de la réduction de la distance entre les particules où la contrainte est appliquée. [Berodier et Scrivener, 2014].

I.4.1.3 Effet de compacité des particules

Les particules fines en tant que filler pourraient améliorer le compactage du liant et, à leur tour, réduire les espaces capillaires interstitiels que les hydrates doivent remplir. Une réduction de l'espacement interparticulaire améliore les caractéristiques de durcissement en réduisant le temps de prise et en améliorant les propriétés mécaniques au jeune âge. La densité de compactage augmente lors d'un ajout mineur (<10–15%) de poudre de calcaire fin [Chen et al., 2016]. De plus, le calcaire est plus tendre que le clinker et, par conséquent, il est broyé à une finesse supérieure à celle du clinker pendant le processus de broyage [Marzouk et Lecomte, 2013]. Une augmentation du calcaire de 5 à 35 % s'est avérée augmenter l'intensité de compacité de 0,53 à 0,58 [Knop et Peled, 2016]. De plus, le calcaire peut offrir un avantage direct en tant que filler à faible coût pour l'optimisation du compactage afin de concevoir des bétons pour des applications spéciales telles que le béton autoplaçant et à haute performance [Chen et Kwan, 2017]. Dans la figure I.2, il est clair que le remplacement des grains de ciment par du filler laisse relativement plus d'espace aux hydrates des phases de clinker [Scrivener et al., 2015].

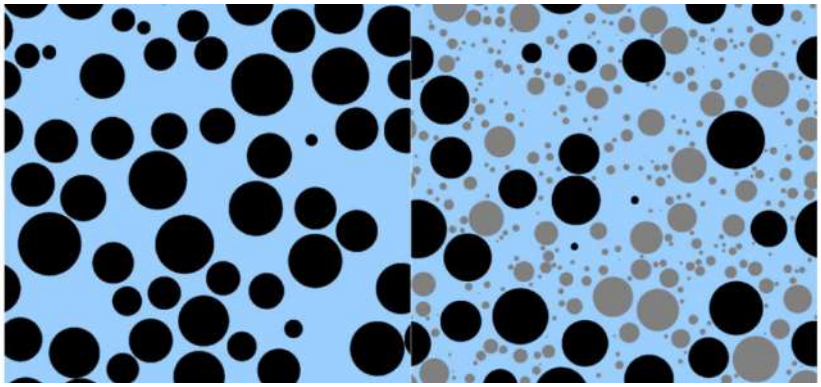


Figure I.4 : Schéma de la répartition des particules après mélange pour un système 100 % ciment Portland (à gauche) et avec 40 % de filler (à droite). [Extrait de Scrivener et al., 2015]

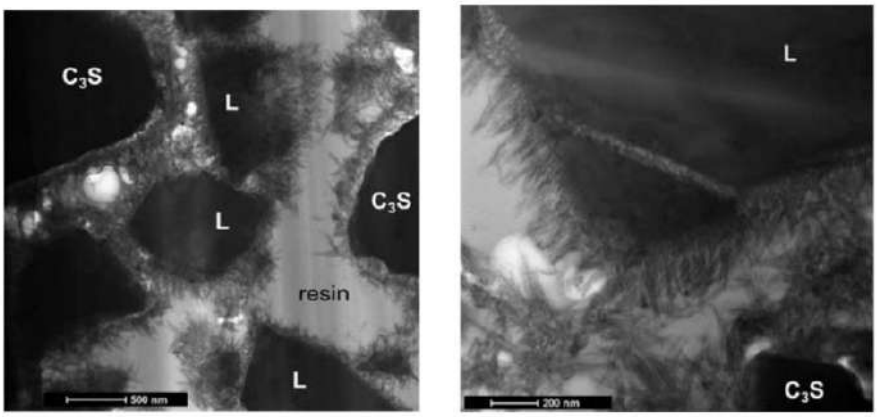
I.4.2 Effets chimiques

Une dépendance multi-ionique contrôle la réactivité chimique de la poudre de calcaire pendant le processus d'hydratation, qui est basée sur les conditions, thermodynamiquement favorables, de la dissolution des ingrédients pour que la précipitation des hydrates carbonatés se produise. Dans un système cimentaire à plusieurs composants, la vitesse de dissolution du calcaire et des SCM pourrait également entraîner une dépendance de l'interaction aluminate-carbonate pendant le processus d'hydratation. Le degré de réaction est régi par les effets de la taille des particules pour augmenter la dissolution du calcaire, la disponibilité des aluminates et l'espace/les pores pour la précipitation des hydrates. De plus, la nature réactive de la calcite est un sujet de débat, car de nombreuses publications traitent explicitement du calcaire comme filler. Au contraire, une importance considérable sur l'assemblage des phases est également soulignée dans la littérature, avec beaucoup d'emphase sur les raisons pour lesquelles le calcaire ne peut pas être simplement considéré comme un filler inerte [Courard et Michel, 2014]. Le calcaire a une plus grande efficacité en tant que filler et une capacité à accélérer l'hydratation du clinker [Oey et al., 2013]. Pour expliquer la contribution chimique du calcaire, l'interaction est en outre classée en différents mécanismes, comme le montre la Figure II.2. Au fur et à mesure que le calcaire se dissout, les ions carbonate sont également librement disponibles dans la solution interstitielle. Les ions de carbonate entraînent deux interactions distinctes, à savoir la préservation de l'ettringite et la formation de carbo-aluminate qui est expliquée en détail comme l'impact de l'ajout de calcaire sur la phase de mélange.

I.4.2.1 Nucléation de C-S-H sur une surface riche en Ca.

Une observation courante avec l'ajout de fines de calcaire est l'accélération de l'hydratation majeure du C_3S, comme indiqué dans les profils de chaleur calorimétriques. L'efficacité du

calcaire pour accélérer l'hydratation et réduire la période dormante est nettement supérieure à celle des autres fillers [P´era et al., 1999], [Lothenbach et al., 2008]. Cependant, la moindre probabilité de surfaces Ca^{2+} réduit l'ampleur de l'accélération dans la dolomie, par opposition à la calcite [Scherer et Bellmann, 2018]. Le déplacement de la courbe d'hydratation du liant argileux calciné en présence de fillers suit un ordre calcaire > dolomie > quartz [Krishnan et Bishnoi, 2018]. La figure 5 présente une micrographie électronique à balayage d'un liant composé de C_3S et de calcaire [Bazzoni, 2014]. La nucléation des produits d'hydratation à la surface des grains de calcaire en proportion égale à celle des grains de C_3S est bien montrée sur la Figure I.5 (a). Une micrographie agrandie des hydrates formés sur la particule de calcaire est illustrée à la Figure I.5 (b). La nucléation de C-S-H à la surface de la calcite conduit à une distribution hétérogène des produits d'hydratation, ce qui homogénéisera davantage la microstructure et facilitera la réduction de la porosité capillaire ouverte. Cet effet pourrait en partie compenser la dilution causée par l'ajout de calcaire et parfois produire une amélioration marginale des performances au jeune âge à un dosage de calcaire plus faible.



(a) (b)

Figure I.5 : Image MEB montrant la nucléation sur des grains de calcaire pour un mélange de 60 % d'alite (C3S) et de 40 % de calcaire (L) (Extrait de Dhandapani et al., 2021).

I.4.2.2 Accélération de la réaction C_3S

La dissolution de la calcite dans la solution interstitielle libère des ions Ca^{2+} dans la solution. L'indice de saturation de la phase du silicate de calcium hydraté (C-S-H) augmente ainsi, ce qui améliore encore la tendance à la précipitation C-S-H. Berodier et Scrivener [2014] ont montré que la concentration de Ca en (mg/L) augmentait de 596 à 630 pour les un ciment contenant respectivement 40 % de quartz et 40 % de calcaire. Lorsque la dissolution de la calcite augmente la concentration en ions Ca^{2+}, une augmentation du potentiel d'activité ionique entraîne une valeur positive plus élevée de l'indice de saturation pour la phase C-S-H pour une quantité similaire de Si dans la solution interstitielle [Berodier et Scrivener, 2014].

Ainsi, la force motrice pour la précipitation du C-S-H est améliorée. Cependant, cet effet peut être marginal par rapport à la dilution du clinker, c'est-à-dire que la réduction de la quantité de C-S-H produite par la substitution du clinker par du calcaire sera plus élevée, par rapport à une augmentation des précipitations de C-S-H. Lorsque le calcaire est considéré comme un substitut à la place d'un SCM, les ions Ca^{2+} du calcaire contribueraient positivement aux premiers âges à la place des SCM déficients en calcium et une étude montre également que le calcium du calcaire joue un rôle crucial dans la facilitation de la formation de carboaluminate [Puerta-Falla et al., 2016].

I.4.2.3 Impact sur l'assemblage des phases

En présence des carbonates, les aluminates sont consommés pour former des carboaluminates. Dans le processus, l'ajout de calcaire conduit également à un phénomène appelé stabilisation de l'ettringite, c'est-à-dire la préservation de l'ettringite formée à un âge précoce. Le mécanisme de conservation de l'ettringite et de la formation de carboaluminate continue d'être un sujet d'intérêt de recherche dans différents types de formulations de liants. La quantité d'ettringite s'est avérée stable dans la pâte de ciment contenant 35% du calcaire [Kakali et al., 2000]. Les auteurs en ont conclu que, dans les pâtes contenant du $CaCO_3$, soit comme réactif chimique, soit comme constituant calcaire, la transformation de l'ettringite en monosulfate est retardée, tandis que le monocarbonate d'aluminate de calcium se forme de préférence au lieu du monosulfate même aux âges précoces. De plus, l'hydratation des silicates de calcium est accélérée [Kakali et al., 2000]. Bonavetti et al. (2001) précisent qu'initialement les mono-sulfates (Ms) sont formés puis transformés en carboaluminates [Bonavetti et al., 2001]. Cette conversion s'accompagne d'une augmentation de la teneur en ettringite due à la libération des sulfates de Ms.

De plus, l'étude a également montré la persistance de l'ettringite en présence d'ions carbonate à des concentrations plus élevées sur la base des prédictions thermodynamiques (Figure I.6). La modification des produits d'hydratation pourrait entraîner un volume maximal du produit d'hydratation solide à un rapport CO_2/Al_2O_3 de 0,33 (Figure I.6), ce qui indique qu'une faible réactivité de la calcite, et pas nécessairement la quantité réactive totale de calcite, conduit à amélioration des propriétés de remplissage de l'espace dans les systèmes cimentaires. Pour un volume solide maximal, un rapport CO_2/Al_2O_3 de 0,33 à 0,66 est idéal pour la coexistence de la phase tri-sulfate (AFt), la phase mono-carbo-aluminate (Mc) et la phase hemi-carbo-aluminate (Hc) [Matschei et al., 2007]. La préservation de l'ettringite se produit avec toute forme de carbonates tels que la dolomie, la poussière de marbre et la pierre riche en carbonates [Krishnan et al., 2018]. De plus, la faible dissolution de la calcite la rend idéale

pour la précipitation des phases de carboaluminate car la formation des phases se produit à une faible teneur optimale en carbonate dans la solution interstitielle, c'est-à-dire <7,8 µmol/L, selon Matschei et al. (2007) [Damidot et al., 1994].

Des concentrations plus élevées de carbonates ont tendance à précipiter/maintenir la calcite. La réaction de la calcite dépend du rapport carbonate-aluminate comme le montre la Figure I.6 ; l'ettringite atteint un maximum optimal à 0,33 avec la quantité croissante de Hc ; entre 0,33 et 0,66, Hc se transforme en Mc, et au-dessus de 0,66 la calcite se précipite [Matschei et al., 2007].

La formation et la quantité de phases CO_3-AFm et AFt et leur coexistence étaient très sensibles au pH de la solution interstitielle [Feng et al., 2016]. De plus, certains carbonates se sont avérés adsorbés sur le C-S-H, ce qui est confirmé sur la base de 8 % de calcaire consommé dans de l'OPC ordinaire + 45 % de calcaire [Kumar et al., 2017]. La présence de sulfate en excès réduit ou retarde la formation de carboaluminate comme constaté par l'ajout de 0, 5, 10% de gypse supplémentaire qui avait retardé la formation de carboaluminates à 1, 7 et 90 jours, respectivement [Krishnan et al., 2019]. Des études montrent également que la teneur en calcium apportée par $CaCO_3$ joue également un rôle sur l'augmentation de la formation de carboaluminate, ce qui est moins probable en présence de carbonate de sodium plus soluble [Puerta-Falla et al., 2016]. Dans un mélange binaire de calcaire avec du ciment Portland, la formation de carboaluminate se produit en raison de réactions entre C_3A et $CaCO_3$, et se limite le plus souvent aux âges précoces (<3 jours) car le C_3A serait complètement consommé [Chowaniec, 2012]. Dans les mélanges composites avec des SCM à base de calcaire et d'aluminosilicate, la réaction du carbonate d'aluminate serait maintenue à des âges plus avancés.

Par exemple, les carboaluminates se sont avérés présents jusqu'à 90 jours dans une combinaison ternaire avec des cendres volantes-calcaire [Weerdt et al., 2011] et du métakaolin-calcaire [Antoni et al., 2012]. Les carboaluminates se sont avérés stables même jusqu'à 4 ans en condition d'auto dessiccation [Dhandapani et Santhanam, 2020]. Les phases AFm sont contrôlées par la disponibilité de la calcite et des aluminates réactifs du calcaire et des SCM, respectivement, et l'espace poreux disponible. Ainsi, la disponibilité de l'aluminate gouvernerait éventuellement le bénéfice du calcaire et contrôlerait la dissolution de la calcite. La consommation de calcite s'est avérée plus élevée à une teneur optimale en alumine [Puerta-Falla et al., 2015].

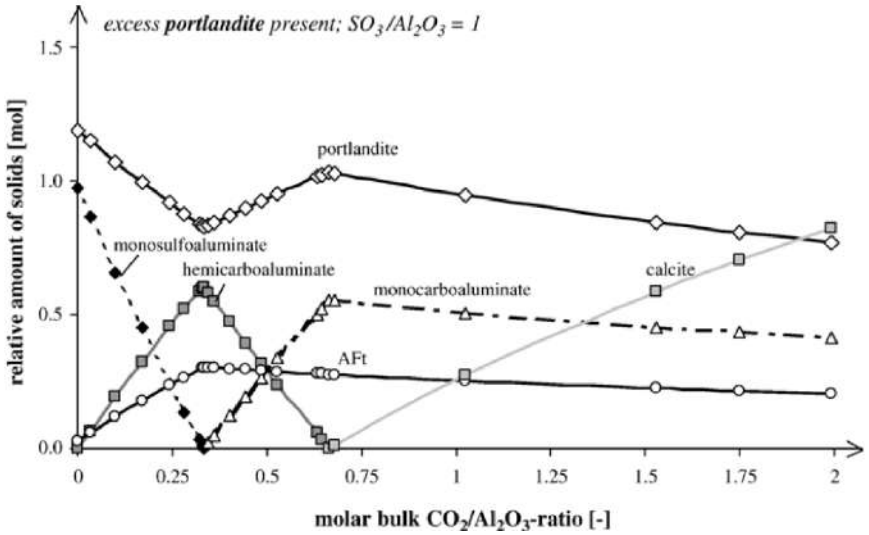


Figure I.6 : Quantité relative de phases hydratées d'un mélange modèle hydraté composé de C3A, de portlandite et avec un rapport de sulfate fixe (SO_3/Al_2O_3=1) en fonction de l'évolution des rapports de carbonate (CO_2/Al_2O_3) à 25 °C (quantité totale constante de solides, $C_3A+CaSO_4+CH+Cc$ = 3,25 mol, mis à réagir avec 500 g d'eau ; les données sont exprimées en unités molaires) [Matschei et al., 2007].

Certaines études proposent également un scénario de teneur en calcaire nécessaire pour que la totalité de l'alumine disponible de la pouzzolane soit utilisée comme combinaison idéale d'un liant ternaire [Ramezanianpour et al., 2014]. Cependant, une simple augmentation des sources d'alumine réactive telles que l'aluminate de calcium ou l'alumine pure n'était pas utile pour améliorer la réaction de la calcite [Puerta-Falla et al., 2015] . Cela pourrait expliquer la raison de la quantité maximale de formation de Hc + Mc dans l'argile calcinée avec une teneur en kaolinite de 40 à 60 %, comme indiqué dans [Avet et Scrivener, 2018]. Il est important de comprendre qu'il pourrait également y avoir une intervention de Si réactif plus élevé présent dans l'argile calcinée de haute pureté, ce qui pourrait favoriser la formation de C-A-S-H au détriment des carboaluminates. Dans les mélanges à faible rapport E/L (0,14), il a été constaté que la quantité de Mc augmentait à seulement 6 à 8 % jusqu'à 28 jours et restait la même en raison d'une éventuelle limitation de l'espace poreux [Huang et al., 2017]. La cinétique de dissolution du SCM s'est avérée contrôler la formation de carboaluminate ; la prise en compte d'une cinétique appropriée s'est avérée essentielle pour prédire la quantité plus élevée de Mc dans les assemblages de phases [Kunther et al., 2016]. Le rôle de la formation de carboaluminate est également crucial pour comprendre l'interaction chimique du calcaire dans les liants ternaires et continue de faire l'objet de débats actifs dans la littérature. De plus, une distinction claire de la contribution réelle de ces altérations de phase à l'amélioration des performances n'est pas établie. En outre, l'amélioration du potentiel pouzzolanique de

l'aluminosilicate (par le C-A-S-H pouzzolanique) pourrait masquer les performances, qui doivent être évaluées plus finement. Des études plus détaillées sur la formation des phases carboaluminates et leur contribution au remplissage des pores et aux propriétés du béton doivent être réalisées.

I.5 Facteurs régissant les caractéristiques d'hydratation des liants composites à base de calcaire

Un grand nombre d'études sur le rôle du calcaire dans le ciment Portland calcaire (PLC) s'est concentré sur la cinétique d'hydratation, principalement motivée par l'intérêt pour le comportement d'accélération [P´era et al., 1999]. Poppe et Schutter [2005] ont montré que la courbe de dégagement de chaleur se déplaçait vers la gauche et vers la droite en utilisant respectivement du calcaire et du quartz en raison de l'accélération de la réaction du clinker avec le calcaire. Des études sur le schéma de flux de chaleur des mélanges binaires et ternaires, y compris les cendres volantes, le métakaolin et le calcaire, ont montré que la pente de la courbe d'accélération était plus raide et que le pic était atteint plus tôt dans les mélanges ternaires par rapport à l'OPC et aux mélanges binaires [Arora et al., 2016]. Comme l'interaction chimique du calcaire est limitée dans le PLC, les avantages physiques sont contrôlés par la qualité (c'est-à-dire la pureté ou la teneur en calcite), la quantité et la granulométrie du calcaire. Dans certains cas, le déplacement de l'accélération de la courbe calorimétrique s'est avéré moindre avec le calcaire dolomitique [Barsi et al., 2020]. Cependant, l'interaction chimique des carbonates était présente avec le calcaire dolomitique, qui promet d'être un ajout précieux pour l'utilisation de la dolomie dans les liants composites [Zajac et al., 2018].

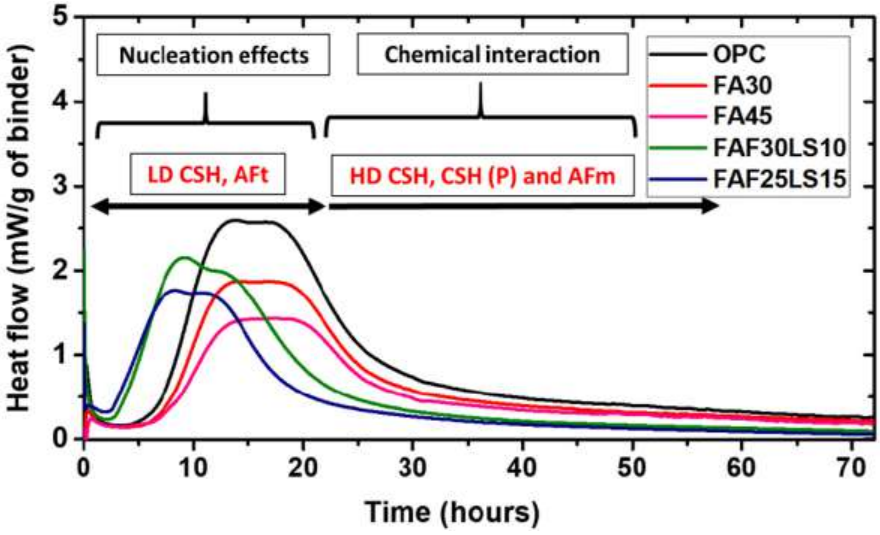


Fig. 7. Taux de chaleur des systèmes de liant binaire et ternaire. FA30 et FA45 sont des

mélanges liants avec des cendres volantes à 30% et 45% de substitution s et FAF30LS10 et FAF25LS15 sont des mélanges ternaires avec 10% et 15% de calcaire [Dhandapani et al., 2016].

La figure 7 présente les caractéristiques d'hydratation du liant à base de cendres volantes avec et sans ajouts de calcaire [Dhandapani et al., 2016]. Il existe une différence notable dans les caractéristiques d'hydratation des cendres volantes en raison des ajouts de calcaire et la contribution du calcaire est marquée dans les différentes étapes d'hydratation. Le potentiel hydraulique des phases de clinker pourrait s'améliorer avec la dilution et l'augmentation du degré de réaction comme le montre [Krishnan et al., 2018]. Une autre observation courante avec l'ajout de calcaire est l'augmentation de la teneur en eau liée [Tsivilis et al., 1998]. Dans une étude sur des matériaux à base de ciment calcaire avec différents types de laitiers [Kucharczyk et al., 2015], les laitiers à plus forte teneur en alumine se sont avérées avoir une eau liée plus élevée, ce qui signifie une plus grande quantité de réaction chimique et de formation d'hydrates. Dans [Bonavetti et al., 2001], ils ont montré une preuve quantitative d'augmentation du degré d'hydratation du C_3S, qui a doublé de près de 20 % à 43 % avec 10 % et 20 % d'ajout de calcaire. Des études ont également été tentées pour modifier les modèles d'hydratation en invoquant un paramètre pour l'augmentation de l'étendue de l'hydratation due à l'ajout de calcaire, comme la nucléation et la dilution, ainsi que la formation de Mc et Hc [Bentz, 2006].

I.5.1 Taille des particules de calcaire

L'étude réalisée par [Cao et al., 2019], a mis l'accent sur le rôle des fines calcaires sur l'accélération physique de l'hydratation aux âges précoces en fonction de leurs finesses. La présence de fines calcaires diminue la chaleur d'hydratation de la réaction et améliore la dissolution des OPC et des SCM [Bentz, 2014]. Cet aspect serait d'un intérêt considérable à explorer pour le bétonnage à basse température où les mélanges de SCM à volume élevé entraînent des résistances au jeune âge inférieures.

En fait, il existe deux façons de préparer des mélanges de ciment ternaire, à savoir : broyage de matières premières ensemble dans un broyeur à boulets ou bien, broyer chaque matière première séparément jusqu'à une finesse fixe, puis mélanger les matières premières ensemble. Ces processus de broyage et de mélange des fines calcaires avec les autres composants ont été étudiés par [Krishnan et al., 2018], et il a été constaté que ces derniers modifiaient l'influence du calcaire sur le taux d'évolution de la chaleur. Cependant, certaines études suggèrent que le broyage et le mélange de calcaire se sont avérés efficaces dans le ciment mélangé à base d'OPC + calcaire [155]. Le calcaire doit être finement broyé (<10 μm ou plus fin que le

composant de ciment Portland) pour avoir un impact positif sur l'hydratation précoce. L'utilisation de l'approche de mélange pourrait être idéale pour des études plus contrôlées sur les ajouts de calcaire. Il est nécessaire d'évaluer l'efficacité des ressources industrielles actuellement utilisées pour valider si elles peuvent produire des avantages physiques et chimiques similaires, par rapport aux ceux obtenus dans les laboratoires, à partir d'ajouts de calcaire en raison de la différence de distribution granulométrique. Par exemple, la courbe granulométrique d'un matériau de qualité laboratoire et de deux calcaires différents actuellement utilisés comme fillers dans les cimenteries indiennes est donnée à la Figure I.9.

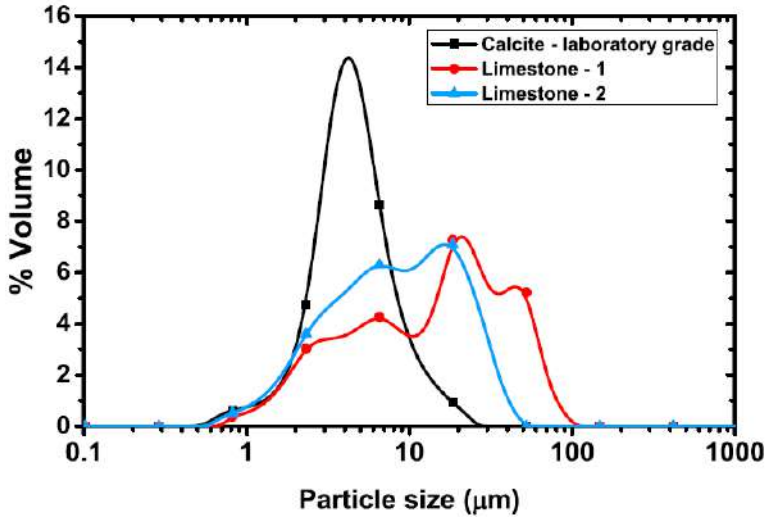


Figure I.8 : Courbes granulométriques des fines calcaires de qualité laboratoire et de deux autres utilisées comme fillers dans la production de ciment (Extrait de Dhandapani et al., 2021).

La différence de dispersion des particules dans les deux cas peut être nettement remarquée et pourrait affecter les avantages de calcaire. Une ligne directrice systématique pour l'optimisation de la taille des particules et des processus de production du liant ternaire doit être établie pour garantir l'adoption appropriée sur le terrain des fines calcaires dans les liants de substitution à volume élevé.

Tableau I. 4 : Effet des fines calcaires sur l'hydratation du ciment (Extrait de [Cao et al., 2019])

Author (Date) [Reference]	Binder		Particle Size (μm)		Blaine Fineness (cm^2/g)		Main Action Mechanism
	Mass Content (wt.%)	Volume Content (vol. %)	LS	PC	LS	PC	
Bonavetti et al. (2001) [30]	(20%) LS + (80%) PC	–	D_{61} = 13.2	D_{90} = 26.6	7100	2850	Chemical effect
Poppe et al. (2005) [5]	(0–67%) LS + (33–100%) PC	–	$D_{50} \approx 10$	$D_{50} \approx$1 7 (CEM I 42.5R); $D_{50} \approx 18$ (CEM I 52.5); $D_{50} \approx 10$ (CEM I 52.5 HSR LA)	5260	2810 (CEM I 42.5R); 2860 (CEM I 52.5); 4180 (CEM I 52.5 HSR LA)	Nucleation effect, Chemical effect
Ye et al. (2007) [9]	(33–43%) LS + (57–67%) PC	–		–	5260	4200 (CEM I 52.5)	Nucleation effect
Lothenbach et al. (2008) [49]	PC4: (4%) LS + (96%) PC	–	Mean particle size: 4	–		4130 (PC); 4290 (PC4)	Chemical effect
Weerdt et al. (2011) [32]	(0–5%) LS + (0–35%) FA + (65–100%) PC	–	D_{50} = 4	D_{50} = 11	8100	4500	Chemical effect
Bentz et al. (2012) [50]	–	(0–10%) LS + (30–40%) FA + (55–100%) PC	D_{50} (median particle size of LS) = 4.4, 16.4; Nano-LS (nm): 50–120	D_{50} (median particle size) ≈ 20	–	4760	Nucleation effect; Chemical effect
Vance et al. (2013) [47]	–	(0–40%) LS + (0–10%) FA/MK + (50–100%) PC	D_{50} (median particle size) = 0.7, 3, 15	$D_{50} \approx 10$	–	–	Nucleation (0.7 and 3 μm LS); Chemical effect
Zajac et al. (2014) [51]	Laboratory cement containing 15% of LS; Commercial cement containing 1%, 3%, 9% of LS, respectively	–	D_{50} = 8 (LS in laboratory cement)	–	7000 (LS in laboratory cement)	–	Nucleation effect; Chemical effect
Thongsanitgarn et al. (2014) [35]	(0–30%) LS + (0–30%) FA + (70–100%) PC; (0–15%) LS + (85–100%) FA	–	Maximum particle size: 5, 20	–	–	–	Nucleation effect, chemical effect (5 μm); Dilution effect (20 μm)
Bentz et al. (2015) [26]	(0–10%) LS + (0–20%) FA + (75–100%) PC	–	D_{50} = 1.58 (Fine LS); D_{50} = 15.7 (Coarse LS); D_{50} = 7.11 (Mmarblewhite); D_{50} = 3.09 (Sturcal F); D_{50} = 1.59 (HT Sturcal F)	D_{50} =10.6 (Type III cement); D_{50} = 9.85 (White cement); D_{50} = 11.9 (Type I/II cement)	–	4810 (Type III cement); 3970 (White cement); 3730 (Type I/II cement)	Nucleation effect (fine LS and calcite LS); Chemical effect (fine LS); Dilution effect (fine and coarse LS)
Schöler et al. (2015) [29]	(0–20%) LS + (0–30%) FA + (20–30%) BFS + 50% PC	–	D_{50} = 16	D_{50} = 11	4650	5180	Chemical effect

Remarque :
- LS, PC, MK, FA, BFS représentent respectivement le calcaire, le ciment Portland, le métakaolin, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau ; D_{50}, D_{61}, D_{90} représentent les tailles de particules de fines calcaires lorsque la fraction passant est de 50 %, 61 % et 90 %, respectivement. - Les références mentionnées dans le tableau sont celles de [Cao et al., 2009].

I.5.2 Dosage du calcaire

Dans les PLC, l'utilisation du calcaire comme substitut binaire jusqu'à 35 % montre que le calcaire inhibe la conversion de l'ettringite, et favorise au contraire la formation de carboaluminate quel que soit le dosage du calcaire [Tsivilis et al., 1998]. Des études sur le PLC avec 10 % de métakaolin contenant une teneur variable en calcaire de 2 % à 22 % ont confirmé la formation de Mc avec une plus grande quantité d'hydrates et une porosité plus faible. L'utilisation de calcaire plus fin peut potentiellement augmenter le niveau de substitution. Cependant, la réduction des propriétés mécaniques à des doses plus élevées> 30% de calcaire s'est avérée indépendante de la taille des particules du calcaire [Palm et al., 2016] et du type de calcaire, c'est-à-dire de la calcite, de la pierre marbrière ou de la dolomite [Barsi et al., 2020].

Dans le cas de matériaux de substitution à grand volume basant sur les avantages de changements chimiques complexes, il est également nécessaire de valider les résultats sur la pâte de ciment sur l'hydratation et la structure des pores pour les avantages correspondants sur les performances du béton. Par exemple, cela pourrait être nécessaire pour évaluer les

avantages des ajouts de calcaire proposés sur la base d'études en pâte de ciment avec w/b < 0,40, car la demande de remplissage d'espace augmenterait dans les systèmes en béton en raison des interfaces. Il y a un manque important de littérature sur ces études systématiques qui sont cruciales pour l'application des systèmes de liants ternaires dans les infrastructures critiques.

I.5.3 Ajout de gypse

Deux observations majeures dues aux ajouts de gypse sont i) l'augmentation du degré d'hydratation du C_3S due au pic d'aluminate poussé au-delà du pic de silicate et ii) l'augmentation de la quantité d'ettringite due aux sulfates supplémentaires du gypse. L'action filler, qui augmente la vitesse de réaction de la formation de CSH, entraîne l'adsorption de plus de sulfate sur les phases C-S-H et, par conséquent, augmente la demande de sulfate dans tous les types de liants de substitution à volume élevé [Zunino et Scrivener, 2019]. Les premiers aluminates réactifs dans certains SCM nécessiteraient un choix judicieux de la teneur en gypse pour écarter le pic d'aluminate de la réaction du silicate [Antoni et al., 2012]. La figure 10 montre l'effet de l'ajout de gypse sur un ciment composite avec des mélanges de métakaolin-calcaire et de laitier-calcaire. Dans les deux cas, l'ajout de gypse décale l'apparition du pic d'aluminate signifiant la formation continue d'ettringite. L'ajout de sulfates en excès conduirait à des sulfates plus élevés dans la solution interstitielle, ce qui pourrait consommer plus d'alumine et réduire la formation de Mc et Hc [Krishnan et al., 2019]. Compte tenu de l'influence directe sur la chimie d'hydratation des combinaisons calcaire-SCM, les formulations de liant ternaire doivent être soigneusement traitées, optimisées pour une réaction chimique appropriée entre le clinker-SCM-calcaire. Il convient également de tenir davantage compte de la demande de gypse en fonction des niveaux de substitution des formulations ternaires et de la température d'hydratation. Il est également essentiel d'identifier la contribution de la formation de carboaluminate au détriment de l'ettringite supplémentaire ou inversement pour clarifier le rôle de l'optimisation du gypse sur l'hydratation et les propriétés mécaniques au jeune âge.

I.5.4 Caractéristiques des matériaux cimentaires supplémentaires

L'argile calcinée, les laitiers et certaines cendres volantes contiennent différents niveaux d'aluminates réactifs précoces en raison de la teneur en aluminate, de la fraction vitreuse et de leur impact sur la vitesse de dissolution. De plus, les SCM enrichis en aluminate bénéficient généralement de l'ajout de calcaire [Weerdt et al., 2011, Avet et Scrivener, 2018]. Dans une étude sur un système modèle basé sur un mélange de système chaux-pouzzolane pour différents SCM, il a été constaté que l'ajout de carbonate produisait une augmentation de la

résistance à la compression dans l'ordre suivant : métakaolin > cendres volantes > verre, cendre ponce, cendre volcanique [Kasaniya et al., 2019]. Les ajouts de calcaire devraient produire une interaction complémentaire avec certains SCM courants tels que les laitiers, l'argile calcinée (qualité inférieure) et le métakaolin [Ramezanianpour et al., 2014]. Une comparaison claire de l'ajout de calcaire avec différents SCM sur l'hydratation et l'amélioration des performances doit être établie pour une large gamme d'aluminosilicates.

I.5.5 Température de durcissement

Dans les liants ternaires à calcaire, la quantité d'ettringite et de carboaluminate est susceptible d'être affectée par la température. A une température seuil de 48°C, le mono-carboaluminate et l'ettringite se transforment en Ms, accompagnés d'une diminution du volume des hydrates [Tydlit´at et al., 2014]. Ces altérations réduisent la quantité de carboaluminates de forme et peuvent entraîner une réduction du développement de la résistance à une température de durcissement de 50°C dans le liant d'argile calcinée calcinée [149]. La solubilité inverse de la calcite améliore la dissolution du calcaire et contribue aux performances lorsqu'il est durci à basse température. On a vu que le volume des produits d'hydratation était plus élevé à 5% d'ajout de calcaire et une augmentation était encore plus prononcée pour le PLC durci à 10°C qu'à 27°C [Bentz et al., 2017]. Par conséquent, le calcaire pourrait avoir le potentiel d'être un composant idéal pour les mélanges cimentaires dans le bétonnage à basse température ou le bétonnage par temps froid. L'augmentation du degré d'hydratation et l'augmentation de la dissolution de la calcite pourraient améliorer les effets bénéfiques dans de tels scénarios ; cela doit être étayé par des recherches supplémentaires.

I.6 Travaux algériens sur les fines calcaires de concassage

Dans le cadre de la valorisation du SC Algérien, plusieurs travaux ont été achevés jusqu'ici. 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 les fines calcaires de sable concassage algérien contenant jusqu'à 45% de la masse de sable. Dans ce cadre, 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. 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 $CaMg(CO_3)_2$. Ainsi, l'absence de constituants argileux potentiellement nocifs a été vérifiée. 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. L'évolution du besoin en eau, a été étudiée, 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 en 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. 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. Quatre types différents de ciment ont été utilisés tout en maintenant un rapport E/C constant. 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.

Plus récemment, Benabed et al. [2016] ont entrepris une étude expérimentale, 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].

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. [2017, 2018 et 2021], 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.7 Conclusion

Les fines calcaires ont été largement utilisées dans les matériaux à base de ciment. Elles peuvent influencer les propriétés de ces derniers par leurs effets physiques de filler, nucléation et dilution de part, et leur effet chimique d'autre part. Le mécanisme d'action des FC dépend principalement de sa taille et de sa quantité de particules. L'effet filler des FC affine la

microstructure et réduit la porosité des matériaux à base de ciment. Leur effet de nucléation accélère l'hydratation du C_3S, augmente la quantité de produits d'hydratation et réduit la porosité des matériaux cimentaires aux jeunes âges. Leur effet de dilution réduit le pic d'hydratation du C_3S, diminue la quantité de produits d'hydratation et augmente la porosité des matériaux cimentaires. En revanche, leur effet chimique favorise l'apparition du troisième pic d'hydratation, forme du carboaluminate et réduit la porosité des matériaux à base de ciment.

Il reste maintenant à connaitre l'effet du protocole expérimental d'incorporation de ces fines dans les matériaux à base de ciment sur les performances à l'état frais et à l'état durci. Pour répondre à cette question, on va confectionner plusieurs séries de mortier de ciment à base de fines calcaires en changeant le mode d'addition et leur quantité. Dans le chapitre II, on va présenter en détail le protocole expérimental, les matériaux et les appareils utilisés dans notre travail pour atteindre cet objectif.

CHAPITRE II

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

CHAPITRE II : PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse en première partie à la présentation des matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail (sable de concassage, ciment, eau et les fines de calcaires) tout en justifiant leur utilité ainsi que leurs caractéristiques et propriétés.

Dans la seconde partie, on présente la méthode de formulation adoptée pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche.

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 l'ouvrabilité de ciment.

II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

Dans notre recherche, on a utilisé des matériaux locaux disponibles sur le marché algérien, notamment le sable de concassage, que l'on trouve dans notre wilaya de Médéa.

II.2.1 Le sable

Pour mener cette étude, nous avons utilisé un sable de concassage calcaire (Figure II.1). Ce dernier est provient du gisement de Hannacha, wilaya de Médéa.

- Caractéristiques chimiques

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

Tableau II.1 : Analyses chimiques du sable utilisé

Constituant (%)	SiO2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	P.F
Sable concassé	2,50	2,63	0,58	70,69	-	Traces	24,77

- Caractéristiques physiques

1. Masse volumique absolue : 2.60 t/m3
2. Masse volumique apparente : 1.65 t/m3
3. Forme : irrégulière



Figure II.1 : Un sable lavé (0% fines).

II.2.2 Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un CPJ NA442 CEM II/A-L 42,5 N (Matine), avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3078 cm²/g.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans les tableau suivants.

Tableau II.2 : Analyses chimiques du ciment

Composition chimique	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	8.0 ±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5 ±0.5
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	0.02 – 0.05
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7 ±0.5

Tableau II.3 : Composition minéralogique du clinker

Composition minéralogique	Valeur
C3A (%)	7.5 ±1
C3S (%)	60 ±3

Tableau II.4 **:** Propriétés physiques du ciment

Consistance normale de pâte de ciment (%)	26.5 ±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g) (NA231)	3700 - 5200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	< 3.0

Tableau II.5 **:** Résistance à la compression

Type d'essais (EN 196 / mortier)	CPJ CEM II 42,5
Résistance à la compression à 02 jours (MPa)	> 10.0
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	> 42.5

II.2.3. Les Fines calcaires

Les fines calcaires utilisées dans cette étude proviennent du sable de concassage utilisé dans notre étude. Elles sont récupérées par tamisage à travers le tamis de 80 µm sous l'eau du robinet. Ces fines sont d'origine calcaire et contiennent principalement de la calcite (CaCO3).

II.2.4. L'adjuvant

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés dans les bétons lors du malaxage à de faibles dosages par rapport au poids du ciment. Ils provoquent des modifications des propriétés ou du comportement des bétons, dont les superplastifiants qui permettent de donner une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaires à la fabrication des bétons.

Un seul type d'adjuvant a été utilisé dans notre étude, appelé : Medaflow 30. C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de Polycarboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés des bétons. Le Medaflow 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet sans modifier la consistance, de

réduire fortement la teneur en eau du béton. Le Medaflow 30 ne présente pas d'effet de retard de prise.



Figure II.2 : L'adjuvant utilisé : Medaflow 30 (Superplastifiant)

II.2.5. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est définie comme la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec du béton ou mortier, pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton. L'eau de gâchage doit être propre et exempte de toutes impuretés. Dans cette étude et pour la préparation de différents mélanges, l'eau potable de robinet a été utilisée.

II.3 Préparation Des Matériaux

II.3.1 Lavage du sable

Le lavage a été effectué sous l'eau du robinet en procédant au tamisage du sable brut avec un tamis de 80 µm (Figure II.3). Le but de cette tâche est la récupération des fines et l'obtention de sable lavé.



Figure II.3 : Lavage de sable et récupération des fines à travers le tamis 80 µm.

II.3.2 Préparation des mélanges

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, selon la procédure suivante :

- **Préparation**

- La pale du malaxeur doit être réglée à 4.5 mm du bol. (Figure II.4)

- 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.

- **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 pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse lente 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 60s. 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.4 : Le malaxeur utilisé.

II.4. Description des mélanges et désignation

II.4.1 Le mortier

Dans cette partie, nous avons réalisé sept différentes séries de mortiers à base des fines calcaires de concassage en changeant le mode d'addition de ces dernières et le protocole expérimental adopté pour chaque série, bien évident avec un mortier témoin confectionné à titre comparatif sans fines (Tableau II.7). Chaque série contient entre 3 et 5 mortiers, selon la disponibilité des moules prismatiques dans le laboratoire.

- Série I : Substitution du sable concassé avec les fines de 0 à 20% du poids (par pas de 5%).
- Série II : Substitution massique du ciment avec les fines de 0 à 20%.
- Série III : Substitution du sable concassé avec les fines de 0 à 20% du Poids tout en prenant en considération le taux d'absorption des sables concassé selon leur teneur en fines.
- Série IV : Substitution volumique du ciment avec les fines de 0 à 20%.
- Série V : Substitution massique du ciment avec les fines de 0 à 20% tout en ajoutant 1.0% d'un superplastifiant.
- Série VI : Substitution massique du sable concassé avec les fines obtenues par le broyage direct du sable concassé.
- Série VII : Confection des mortiers par différentes méthodes d'ajout de l'eau d'absorption et différentes valeurs de ce dernier (1, 2, 3 et 3.8%).

Tableau II.7 : Compositions des mortiers confectionnés

	% de fines	Sable (g)	Ciment (g)	Fines (g)	L'eau (g)	Sp (g)
Série I	0%	1400	1400	0	700	-
	5%	1330		70		
	10%	1260		140		
	15%	1190		210		
	20%	1120		280		
Série II	0%	1400	1400	0	700	-
	5%		1330	70		
	10%		1260	140		
	15%		1190	210		
	20%		1120	280		
Série III	0%	1400	1400	1400	753.2	-
	5%	1330			758.2	
	10%	1260			764.2	
	15%	1190			771.4	
	20%	1120			777	
Série IV	0%	1400	1400	0	700	-
	5%		1330	58.26		
	10%		1260	116.52		
	15%		1190	174.77		
	20%		1120	233.03		
Série V	0%	1400	1400	0	700	14
	5%		1330	70		
	10%		1260	140		
	15%		1190	210		
	20%		1120	280		
Série VI	0%	1400	1400	0	700	-
	5%		1330	70		
	10%		1260	140		
	15%		1190	210		
	20%		1120	280		
Série VII	MH	1400	1400	-	753.2	-
	MAb				753.2	
	M1				714	
	M2				728	
	M3				748	

II.5 Méthode 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 effectués 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 II.3).

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavant 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 (H1) et du sédiment + floculant (H2).

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

$$ES = \frac{H1}{H2} \times 100 \qquad \ldots(1)$$

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



Figure II.5 : 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 II.4). L'essai a été réalisé selon la norme actuelle EN 933-2.



Figure II.6 **:** 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 tamisas 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. (Figure II.7)

La courbe granulométrique est caractérisée par deux coefficients :

1. le coefficient d'uniformité : **Cu** = $\frac{d60}{d10}$

2. le coefficient de courbure : **Cc** = $\frac{(d30)^2}{d10 \times d60}$

Avec :

- d10 : Diamètre moyen des grains correspondant à 10% passant par poids.
- d30 : Diamètre moyen des grains correspondant à 30% passant par poids.
- d60 : Diamètre moyen des grains correspondant à 60% passant par poids.

La distribution des dimensions des particules est dite :

- bien graduée si : Cu > 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

Tableau II.8 : Analyse granulométrique du sable concassé.

Tamis (mm)	**0%**	**5%**	**10%**	**15%**	**20%**
5	100	100	100	100	100
4	99	98,5	99,7	99,7	99,5
3,15	83,39	81,75	88,2	82,75	88,25
2,5	68,96	67,59	75,8	72,11	77,25
2	56,36	54,72	64,46	62,56	66,61
1,25	36,71	34,83	45,52	46,21	49,08
0,63	21,82	19,62	26,48	26,75	29,48
0,4	14,77	15,74	17,5	14,97	15,66
0,315	11,37	9,93	9,83	6,83	6,15
0,2	6,48	5,52	3,73	2,53	2,38
0,16	4,41	4,23	1,91	1,71	1,1
0,08	0,5	0,26	0,18	0,47	0,18
Fond	0	0,02	0,04	0,34	0,03
Mf	3.57	3.64	3.40	3.37	3.37

-

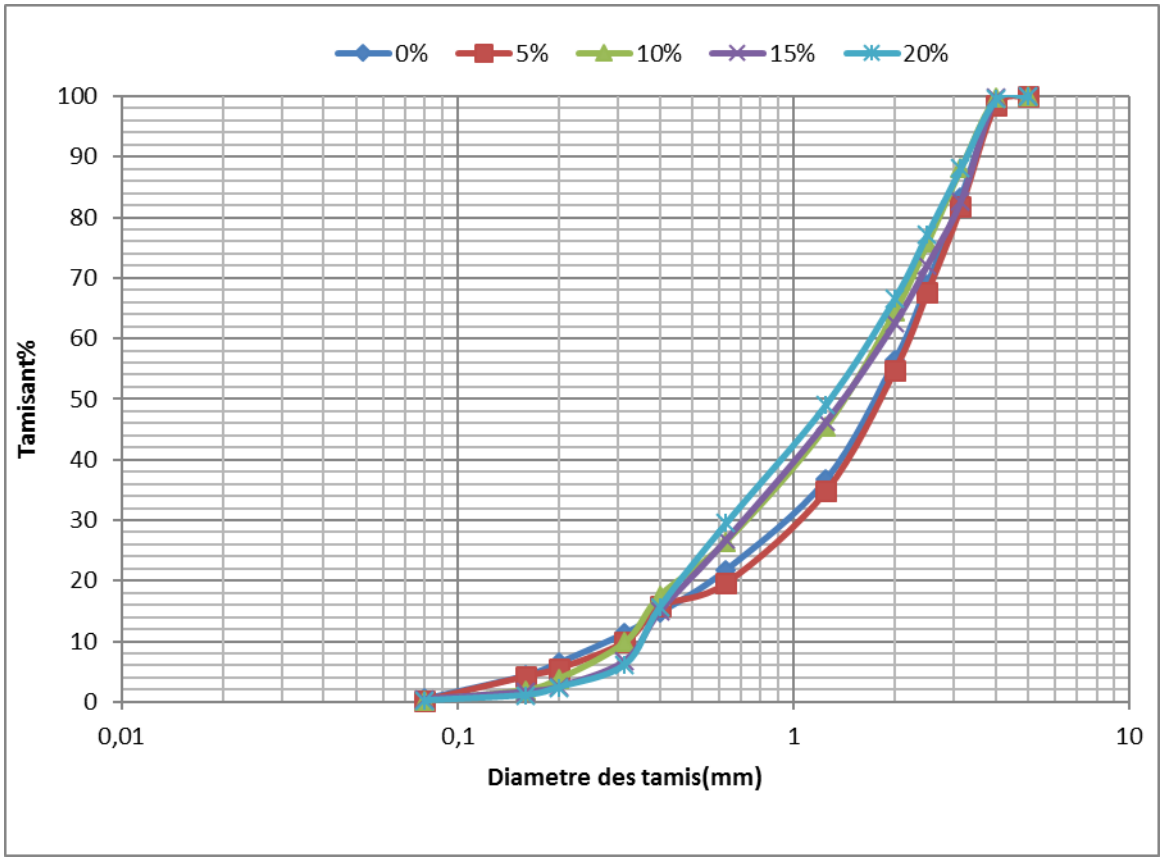


Figure II.7 : Les courbes granulométriques de différentes catégories de sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique des différents sables concassés avec différents pourcentages des fines sont présentés dans la figure … . Nous remarquons que les sables utilisés sont caractérisés par des granulométries continues. De plus, les sables utilisés possèdent des modules de finesse supérieurs à 3.2 (considérés comme des sables grossiers).

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 en vrac et apparent du sable.



Figure II.8 : mesure de la masse volumique.

II.5.1.5 Surface Spécifique [EN 196-6]

1. Principe de la mesure

Perméabilimètre de Blaine mesure de temps automatique selon les normes EN 196-6 et ASTM C204 avec détection des niveaux par des cellules photo-électriques.

2. Conduite de l'essai

Après la mise en place de la cellule remplie de son échantillon de ciment ou fine de calcaires, 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.



Figure II.9 : Détermination de la surface spécifique.

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

1. 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 :

$$\mathbf{Ab(\%)} = \frac{MH - MS}{MS} \times 100$$

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

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

2. Conduite 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. (Figure II.7).

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.10 : Les étapes de détermination du coefficient d'absorption

II.5.2 Essais effectués sur mortier frais

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

1. 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 lesnormes NF P 18-452 et NF P 15-37.

2. 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.

3. Equipement nécessaire

L'appareil utilisé s'appelle Maniabilimètre B, il est schématisé sur la Figure II.8.

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.11 : Le Maniabilimètre.

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

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

1. **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.

2. **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 et une règle de mesure.

3. **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.12 : l'essai d'affaissement pour le mortier

II.5.3 Essais réalisés à l'état durci

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

Tableau II.9 : Les essais de caractérisation sur mortier à l'état durci

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

II.5.3.1 Essai 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 (2-15)

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

$$\mathbf{Rc} = \frac{\mathbf{Fc}}{\mathbf{b^2}} \qquad \text{…. (2.2)}$$

Avec : **Rc :** Résistance à la compression en (MPa) ; **Fc** : Charge de rupture en (N) ;

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



Figure II.13 : Essais de compression

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

II.5.3.2 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.(Figure II.11)

$$\mathbf{Rt} = \frac{1.5 \times l \times Ff}{b^3} \quad \ldots (2.3)$$

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.14 : Essais en flexion



RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va exposer et analyser les résultats de l'étude expérimentale des différents essais effectués, qui sera divisé en deux parties :

- La première partie porte sur les essais physiques préliminaires sur le sable de concassage utilisé dans la confection du mortier, à savoir : l'analyse granulométrique, la propreté, la mesure de la densité ainsi que la détermination du taux d'absorption de sable. Concernant les fines de concassage, on a mesuré la surface spécifique en utilisant l'appareil perméabilimètre de Blaine.

- La deuxième partie, on va discuter des résultats de l'effet des fines calcaires sur le mortier à l'état frais et durcis en adoptant plusieurs protocoles expérimentaux.

III.2 Etude préliminaire sur les sables et fines calcaires de concassage

Avant de procéder aux essais sur le mortier, on va commencer par les résultats des caractéristiques physiques du sable et des fines.

III.2.1 Propreté de sable

La propreté de sable est déterminée par l'essai d'équivalent de sable conformément à la norme NA46. Le tableau III.1 récapitule les résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Tableau III.1 : Valeurs d'équivalent de sable

Catégories de sable	Sable lavé (0% des fines)	Sable avec 5% des fines	Sable avec 10% des fines
ES à vue (%)	100	83.33	84.61
ES au piston (%)	82.60	70.83	61.53

Le tableau III.1 montre que le sable lavé (0% des fines) est parfaitement propre. Donc, il confirme qu'il ne contient que peu de fines. Dans ce cas, il est préférable de ne l'employer qu'avec des dosages en ciment assez élevés. En revanche, pour les sables avec 5% et 10% des fines, les valeurs de l'équivalent de sable à vue sont nettement supérieures à 65 de part, et supérieures à 60% à piston. Ces limites représentent la limite admise par la norme P 18-541. Donc, le sable utilisé peut être considéré comme un sable propres et satisfaisant.

III.2.2 Mesure du taux d'absorption du sable de concassage

La mesure du taux d'absorption du sable de concassage est déterminée par l'essai d'absorption de sable conformément à la norme NF 18-555. 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 plaçant 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.10). Le tableau III.2 représente les valeurs de coefficient d'absorption de sable lavé (considéré contient 0% de fines) et avec 20% de fines.

Tableau III.2 : Coefficient d'absorption expérimentalement mesuré

Catégories de sable	Sable lavé (0% des fines)	Sable avec 20% des fines
Masse saturée (g)	1038.5	1045.44
Masse sèche (g)	999.83	990.87
Taux d'absorption (%)	3.8	5.5

On observe d'après le tableau III.1 que le sable sans fines a enregistré un taux d'absorption égale à 3.8% et pour le sable qui contient 20% des fines calcaires a enregistré un taux d'absorption supérieur à celle que le sable lavé (5.5 %). Les résultats montrent que le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines dans le sable. Selon [Safiddine, 2010], on peut adopter pour les sables contenant 5, 10 et 15% de fines des valeurs d'absorption par colinéarité et régression linéaire en traçant le graphe de l'évolution du taux d'absorption en fonction de la teneur en fines dans le sable (Figure III.1) à laide du logiciel Excel.

A cet effet, on a obtenu un taux d'absorption vaut 4.2, 4.6 et 5.1% pour un sable contient respectivement 5, 10 et 15% de fines (Tableau III.2).

Tableau III.3 : Coefficient d'absorption obtenu par régression linéaire

Catégories de sable	Sable avec 5% des fines	Sable avec 10% des fines	Sable avec 15% des fines
Taux d'absorption (%)	4.2	4.6	5.1

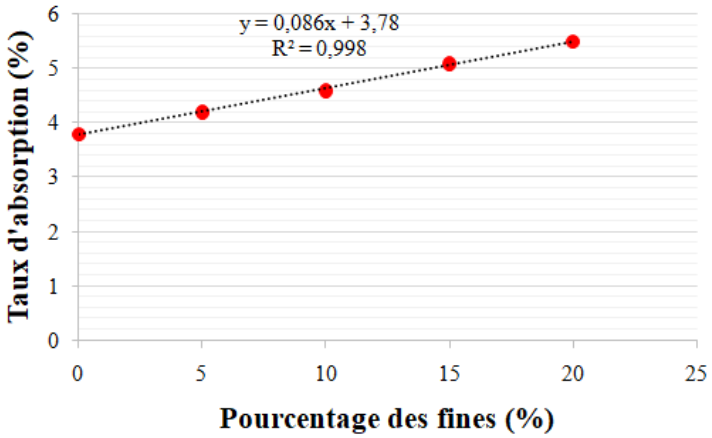


Figure III.1 : L'évolution du taux d'absorption en fonction de sa teneur en fines.

III.3 Effet des fines sur les différentes séries des mortiers à l'état frais et durcis

Dans cette partie, on a effectué plusieurs séries de mortier à base des fines calcaires de concassage en adoptant différents mode d'addition, à savoir : substitution des fines avec le sable, substitution des fines avec le ciment, substitution massique, substitution volumique, avec ou sans superplastifiant…

III.3.1 Effet de la substitution du sable avec les fines (série I)

III.3.1.1 Etat frais

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 la Figure III.2 :

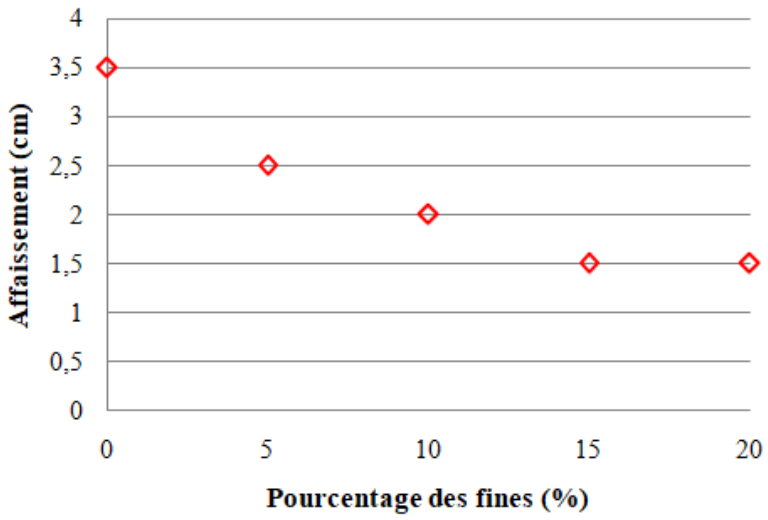


Figure III.2 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des fines.

Les résultats de variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des fines sont représentés dans la Figure III.2. On remarque que la substitution du sable par les fines calcaires conduit à une diminution de l'affaissement. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la surface spécifique et de la finesse du sable due à l'augmentation de la teneur en fines. Ce qui conduit à une demande d'une grande quantité d'eau supplémentaire pour mouiller la surface des particules et atteindre l'ouvrabilité souhaité. La diminution de la maniabilité peut être attribuée à la forme angulaire et irrégulière des grains des fines et leur haute finesse. Cela peut augmenter le frottement entre les grains de mélange de sable. Des résultats similaires ont été rapportés dans d'autres travaux [Menadi et al., 2008 ; Felekoglu et al., 2006 ; Saffidine et al., 2017 ; Benabed et al., 2014].

III.3.1.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression obtenus sont représentés dans la figure III.3.

La Figure III.3 montre l'effet de l'augmentation du pourcentage des fines calcaires dans le sable sur la résistance à la compression des mortiers. A travers la courbe illustrée, on remarque que le mortier qui contient 5% de fines calcaires a enregistré une augmentation de la résistance par rapport au mortier de référence à l'âge de 7 jours. Pour les autres mortiers, avec 10% et 20%, la résistance par rapport le mortier sans fines de calcaires reste pratiquement constant.

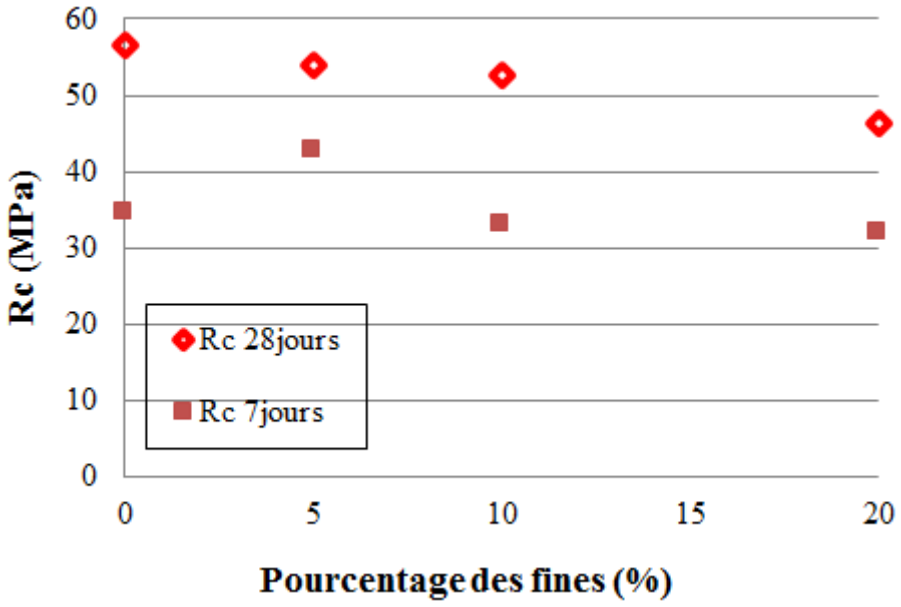


Figure III.3 : Résistance relative à la compression des mortiers en fonction de pourcentage des fines calcaires.

Par contre, à l'âge de 28 jours, les résultats indiquent une diminution de la résistance mécanique à la compression des mortiers. Du point de vue technique, il est logique d'avoir une diminution de la résistance mécanique à la compression du mortier lorsque on utilise un sable contient beaucoup de fines car la qualité de ce dernier dégrade en fonction de la teneur en fines. Physiquement, la substitution du sable par les fines augmente la demande en eau et affecte l'ouvrabilité du mortier. Ce qui conduit à un produit de compacité inférieure et par conséquent, une faible résistance.

ii) Résistance à la traction par flexion

Les résultats obtenus et présentés sur la Figure III.5 ont montré que l'augmentation de pourcentage des fines calcaires augmente la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours même avec 20% de fines. Des résultats similaires sont obtenus par [Gesoğlu et al. 2012]. Cela peut être expliqué par la diminution du module d'élasticité qui rend notre mortier plus souple à la flexion.

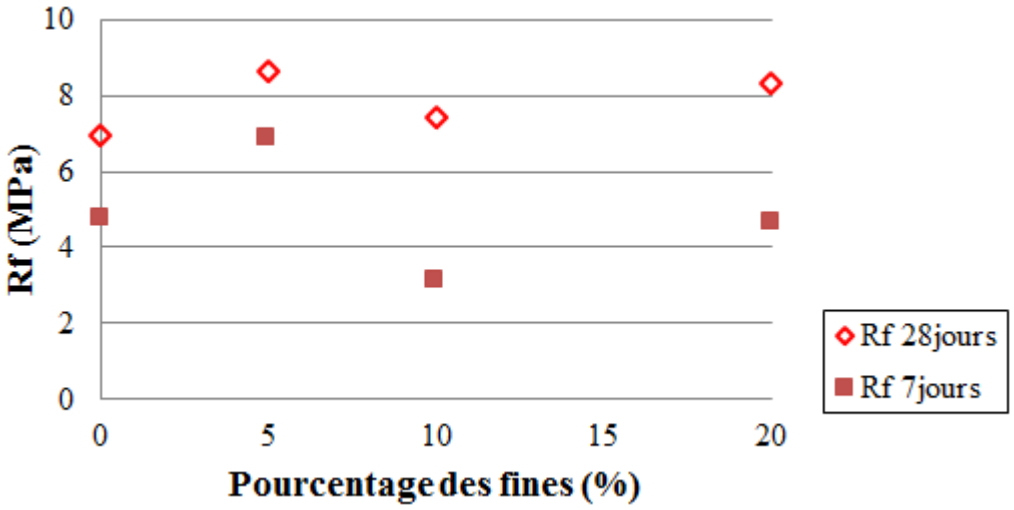


Figure III.4 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de pourcentage des fines calcaires.

III.3.2 Effet de la substitution de ciment avec les fines (série II)

III.3.2.1 Etat frais

Dans cette série, on a confectionné des mortiers à base de fines calcaires en substitution massique avec le ciment en utilisant un sable lavé sans fines.

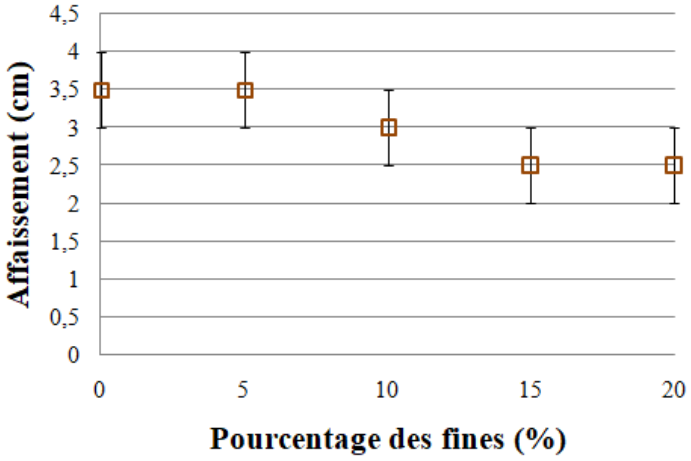


Figure III.5 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des fines.

Si on prend en considération une tolérance d'erreur vaut ± 0.5 cm, on trouvera que tous les points passent par la ligne correspondant au 3 cm d'affaissement, ce qui signifie que la courbe d'affaissement en fonction des fines calcaires est pratiquement constante. Cette proximité dans l'ouvrabilité entre le mortier de référence et les mortiers qui contiennent des pourcentages de fines calcaires est probablement due à la ressemblance de la taille et la

surface spécifique entre les fines calcaires et le ciment utilisé. Ce qui n'affecte pas la demande en eau dans le mortier.

III.3.2.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

D'après la Figure III.6, on remarque une augmentation à la résistance à la compression à l'âge de 7 jours. Le mortier avec 5% de fines calcaires montrent une amélioration de la résistance à la compression par rapport au mortier de référence à l'âge de 7 jours. On peut aussi observer des résistances comparables des mortiers avec 10% et 20% de fines calcaires à ceux du mortier sans ajout. Cette performance peut être expliquée par l'effet physique et chimique au jeune âge des particules du calcaire sur le développement de la résistance des mortiers de ciment. Physiquement, les particules de calcaire peuvent remplir l'espace entre les particules du ciment et aussi bien l'espace entre les particules de sable. Cet effet de remplissage des vides fournit une compacité plus efficace de la phase solide des mortiers de ciment et en résulte une amélioration de la résistance au jeune âge (7 jours). Ce résultat confirme ce qui a été publié par [Ezziane et al., 2010].

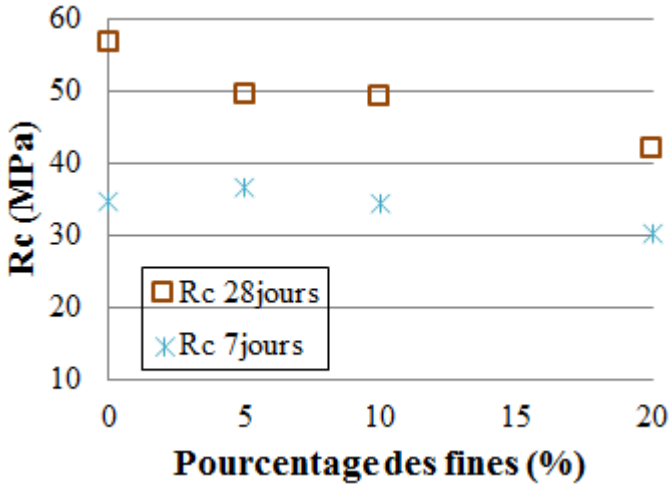


Figure III.6 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression.

A long terme (à 28 jours), la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage des fines calcaires. Le remplacement du ciment par les fines calcaires au-delà de 10% induit une chute importante de la résistance à la compression. La diminution de la résistance peut être attribuée à l'augmentation progressive de la fraction volumique du calcaire dans les mélanges ou la diminution de la quantité du clinker dans le ciment qu'on

appelle effet de dilution. Les résultats sont en accord avec plusieurs études [Menadi et al., 2008 ; Hadj Sadok, 2004 ; Meghroub M].

ii) Résistance à la traction par flexion

D'après les résultats de la Figure III.7, une augmentation de la résistance en flexion est enregistrée pour les échantillons contenant 5% et 10% de fines calcaires comme substitution partielle au ciment à l'âge de 28 jours. Le mortier avec 10% de fines montrent une amélioration de la résistance à la flexion par rapport au mortier de référence et on constate une diminution de la résistance pour le mortier avec 20% des fines calcaires. Par contre on peut voir que l'influence des fines calcaires sur le mortier semble avoir des effets négatifs à l'âge de 7 jours. Ce résultat est pratiquement l'inverse de ce qui a été trouvé pour la résistance à la compression. Ceci peut être expliqué par l'évolution du module de Yong avec la résistance mécanique. En effet, une augmentation de la résistance à la compression provoque généralement une augmentation du module d'élasticité. Ce qui affecte la résistance à la flexion et rend notre mortier plus rigide.

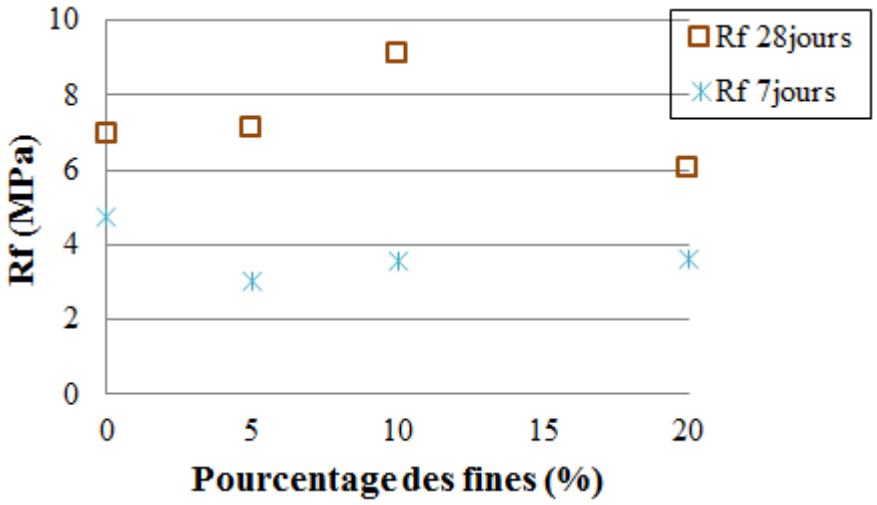


Figure III.7 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la flexion.

III.3.3 Effet de l'absorption du sable (série III)

III.3.3.1 Etat frais

La Figure III.8 présente une série comparable avec la série I, dont on a effectué la substitution des fines avec le sable. Cependant, dans cette nouvelle série, on a pris en considération le taux d'absorption du sable selon sa teneur en fines. En conséquence, une comparaison entre la série I et la série III a été faite. La mesure de l'affaissement montre une allure similaire entre

les deux séries, avec une diminution linéaire de l'affaissement en fonction de l'augmentation de la teneur en fines dans le sable. Bien évident que le mortier dont on a ajouté la quantité d'eau prévue pour l'absorption du sable montre un affaissement plus grand. Ce comportement peut être interprété par la même qu'on a fait avec la première série. Par contre le décalage qui a été enregistré entre les deux courbes peut être expliqué par l'ajout d'une quantité d'eau, égale au taux d'absorption du sable. En revanche, il est à signaler que le taux d'absorption augmente avec l'augmentation de la teneur en fines dans le sable par 0,4% pour chaque 5% de fines. Cette augmentation ne présente pas un effet sur l'allure à cause la faible quantité d'eau ajoutée correspondante.

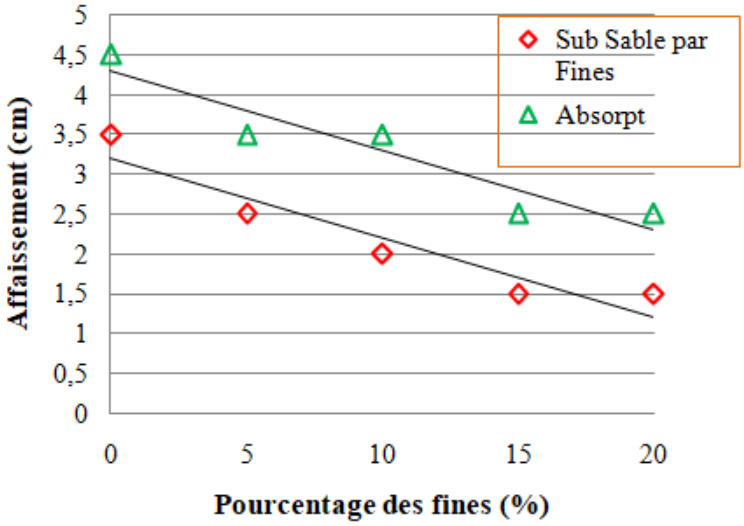


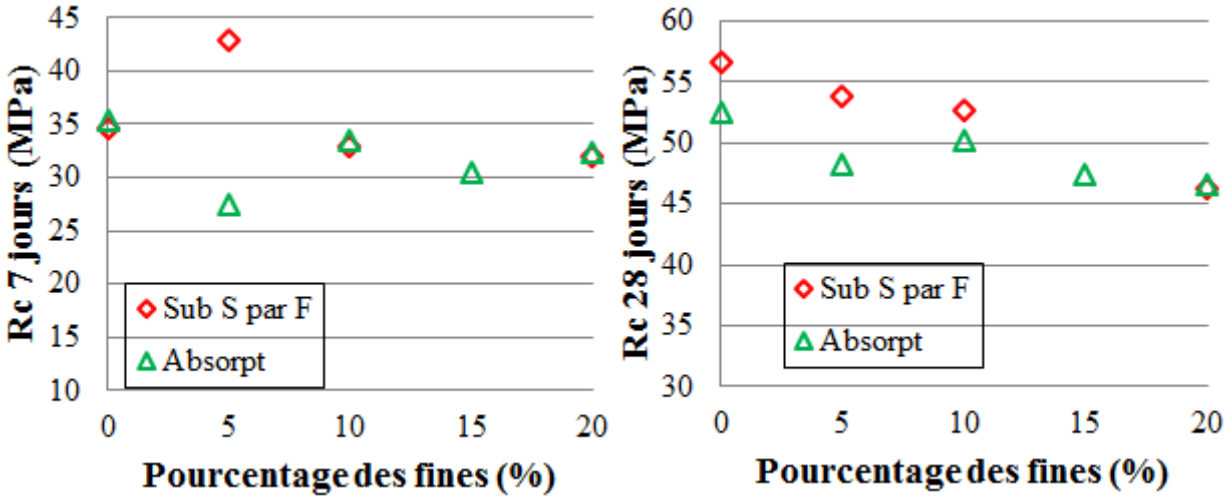
Figure III.8 : Variation de l'affaissement de deux séries I et IV des mortiers en fonction du pourcentage des fines.

III.3.3.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.9 présente l'évolution de la résistance mécanique à la compression de deux séries (I et III). À travers la Figure III.9.b), qui montre les résultats de résistance à la compression à l'âge de 28 jours pour la série I et III. En raison de l'ajout d'une quantité d'eau, correspondant au taux d'absorption, on peut prévoir une diminution de la résistance mécanique. Effectivement, on a enregistré une résistance plus élevée pour la série I pour le mortier sans fine et avec 5% de fines. Mais, à partir de 10%, on peut constater qu'il y a plus de différence entre les deux séries. Ceci est dû à l'amélioration de l'ouvrabilité du mortier pour la troisième série par rapport à la série I (Voir Figure III.8). Ce qui donne un mortier avec une qualité meilleure, plus compact et mieux résistant.

En revanche, la résistance au jeune âge semble identique pour les deux séries. Donc, le rapport eau effective par rapport au ciment n'a pas une influence à 7 jours (Figure III.9.a).

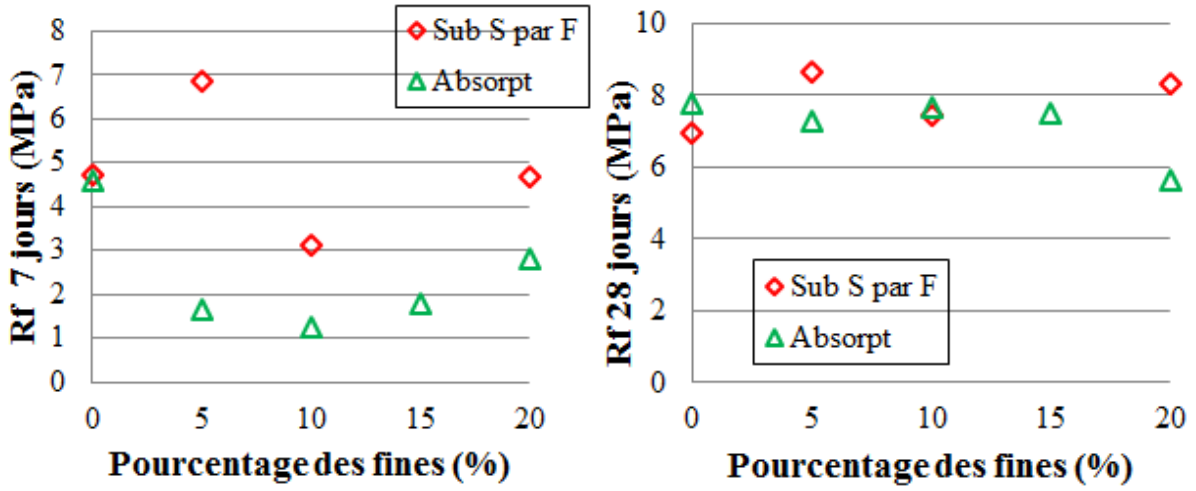


a) b)

Figure III.9 : Variation de la résistance à la compression : a) à 7 jours et b) à 28 jours de deux séries (I et III) en fonction de pourcentage des fines.

ii) Résistance à la traction par flexion

La Figure III.10 présente l'évolution de la résistance mécanique à la flexion, à 7 et à 28 jours, des deux séries (I et III). On peut constater que l'ajout de l'eau d'absorption influe sur la résistance à la flexion à 7 jours en la diminuant par rapport à la série I. Par contre, à 28 jours, on a enregistré une allure de la résistance à la flexion presque similaire, par rapport à la série I jusqu'à 10%. Ensuite, une diminution de la résistance à la flexion pour le mortier avec 20% de fines dans le sable.



a) b)

Figure III.10 : Variation de la résistance à la flexion de deux séries (I et III) en fonction de pourcentage des fines à l'âge de 7 et 28 jours.

III.3.4 Effet de la substitution volumique (série IV)

III.3.4.1 Etat frais

Les résultats de la variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des fines sont représentés dans la Figure III.11, en comparant la substitution volumique avec la substitution massique du ciment avec les fines calcaires de concassage. On peut constater que l'affaissement pour les deux série reste pratiquement constant en acceptant une marge d'erreur égale à ± 0.5 cm. Ainsi, la substitution volumique du ciment par les fines semble sans effet sur l'ouvrabilité du mortier. En comparaison avec la substitution du sable avec les fines, on peut conclure qu'il y a une différence d'effet en changeant le protocole d'addition des fines dans le mortier.

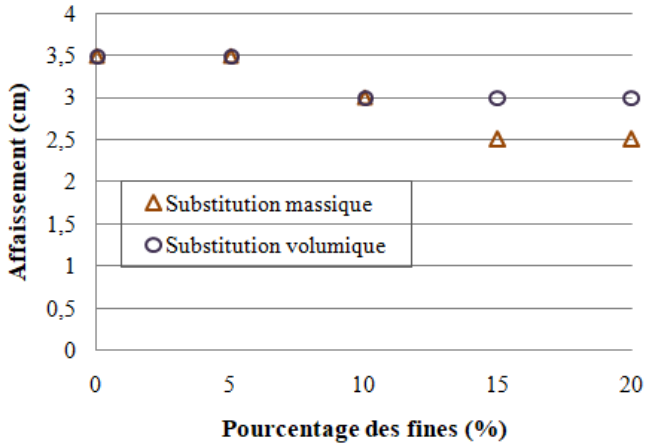


Figure III.11 : Variation de l'affaissement de deux séries (II et IV) des mortiers en fonction du pourcentage des fines.

III.3.4.2 Etat durci

Les résultats de la résistance à la compression des mélanges des deux séries (II et IV) à l'âge de 7 et 28 jours, pour la substitution de ciment par les fines calcaires, respectivement en mode massique et volumique sont illustrés aux Figures III.12. On peut voir que l'influence des fines calcaires semble avoir des effets négatifs à long terme (28jours) pour les deux séries d'échantillons. En augmentant le pourcentage de fines, on constate une diminution de la résistance à la compression. La substitution volumique a montré des résultats légèrement inférieurs à la résistance par rapport la substitution massique. Ceci est dû à l'augmentation du rapport massique E/L, lorsque on garde ce même rapport volumique constant (dans notre cas E/L (volumique) = 1.6). Donc, la quantité d'eau supplémentaire provoque une diminution de la résistance à la traction, surtout pour 20% de fines.

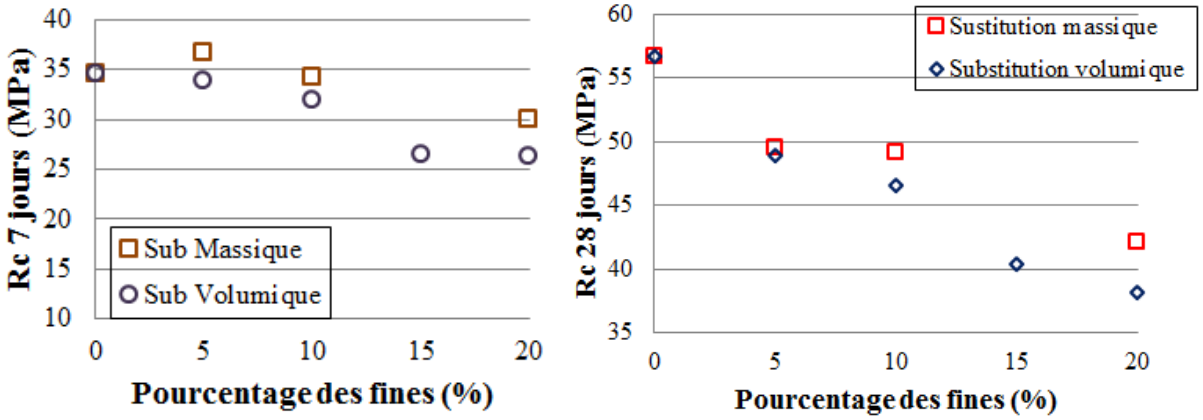
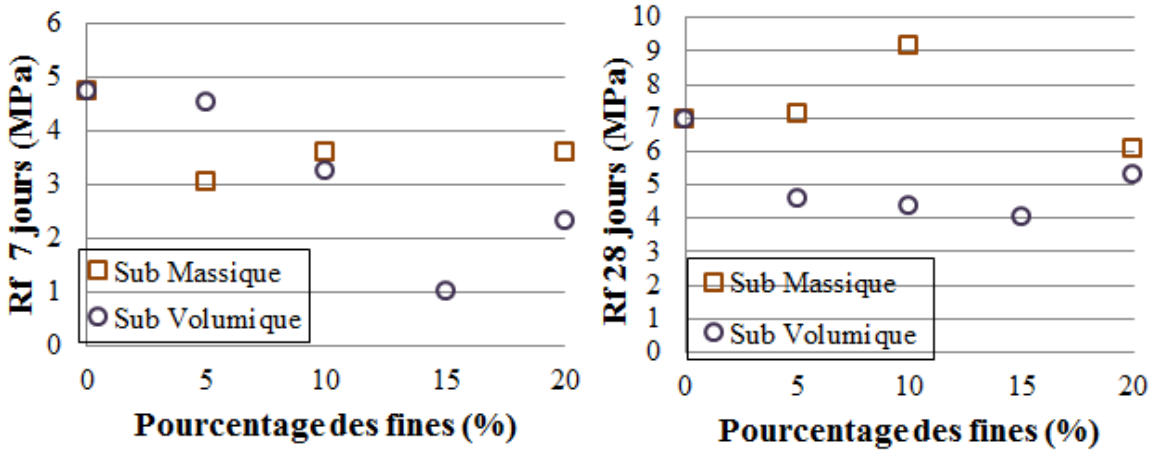


Figure III.12 : Variation de la résistance à la compression de deux séries (II et IV) en fonction de pourcentage des fines à l'âge de 7 et 28 jours.

La Figure III.13 présente l'évolution de la résistance à la flexion du mortier de ciment en fonction de la teneur en fines calcaires de concassage dans le ciment en adoptant le mode de substitution massique (série II) et mode de substitution volumique (série IV).

Pratiquement, on peut faire la même constatation qu'avec les séries précédentes. La résistance à la flexion est inversement proportionnelle avec la résistance à la compression.



(a) (b)

Figure III.13 : Variation de la résistance à la flexion de deux séries (II et IV) en fonction de pourcentage des fines à l'âge de 7 et 28 jours.

III.3.5 Effet de l'ajout du superplastifiant (série V)

III.3.5.1 Etat frais

La figure III.14 présente l'allure de la variation de l'affaissement en fonction de la teneur en fines dans le ciment avec 1% de superplastifiant. Ce dernier a été utilisé seulement dans cette série.

Les résultats montres que l'affaissement augmente avec l'augmentation des fines dans le ciment. Ce résultat est tout à fait l'inverse de ce qu'on a obtenu jusqu'à maintenant en terme

de mesure de l'ouvrabilité en fonction de la teneur en fines calcaires dans le mortier de ciment. Mais, il faut signaler ici que le mortier obtenu dans cette série présente une certaine ségrégation. Cette dernière est devenue de plus en plus flagrante avec l'augmentation du taux de substitution du ciment avec les fines. Autrement dit, la ségrégation devienne plus claire avec la diminution de la quantité du ciment. Ainsi, le dosage en superplastifiant a été calculé par rapport à la masse du liant (ciment +fines calcaire). A cet effet, il est évident que lorsque la quantité diminue, le dosage en superplastifiant par rapport au ciment augmente. Ce qui provoque cette ségrégation en dépassant le seuil de saturation de cet adjuvant.

[Safiddine, 2010] a fait la même série sauf que la substitution des fines calcaires de concassage a été faite par rapport au sable et non pas par rapport au ciment. Dans ce travail, l'affaissement du mortier obtenu a été diminué en fonction de l'augmentation de la teneur en fines dans le sable (Figure III.15), sans aucune ségrégation du mortier.

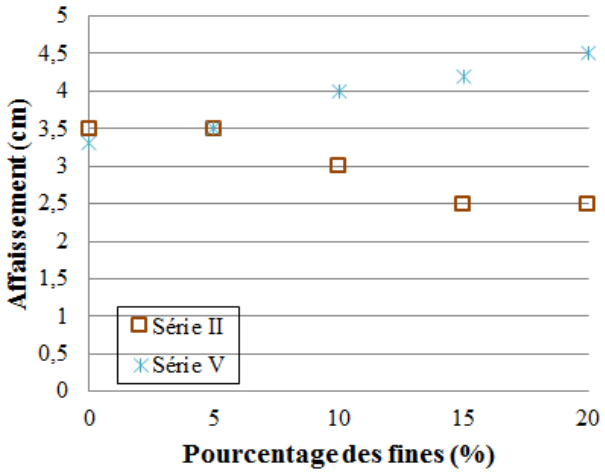


Figure III.14 : Variation de l'affaissement de deux séries des mortiers (II et V) en fonction du pourcentage des fines.

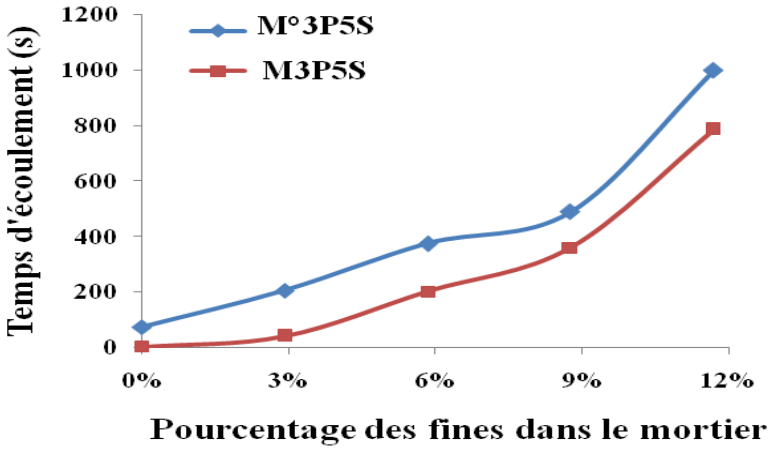


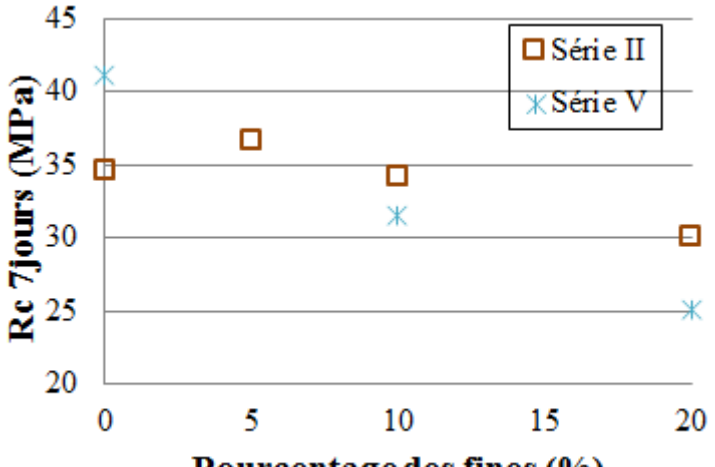
Figure III.15 : L'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre de deux mortiers : sans Sp (M3P5S) et avec Sp (M°3P5S). (Extrait de [Safiddine, 2010])

III.3.5.2 Etat durci

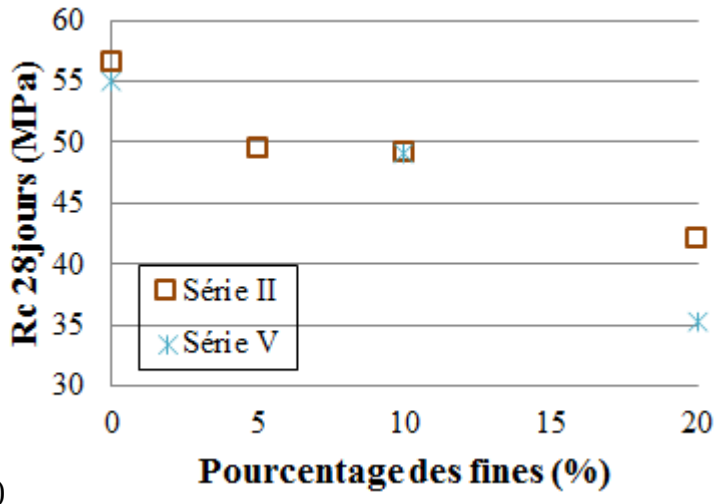
i) Résistance à la compression

La Figure III.16 présente l'évolution de la résistance mécanique à la compression de deux séries (II et V). A travers la Figure III.16.b), qui montre les résultats de résistance à la compression à l'âge de 28 jours pour la série II et V, des résistances presque similaires ont été enregistrées pour le mortier avec 10% du pourcentage des fines. Par contre, une chute de diminution pour le mortier qui contient 20% des fines calcaires avec superplastifiant. Cette diminution est due à la ségrégation qui a été obtenue avec 20 % de fines.

En revanche, une diminution a également été enregistrée au jeune âge avec superplastifiant (série V) par rapport la série II (Figure III.16.a). Ceci montre que le superplastifiant peut avoir un effet retardateur de prise au jeune âge avec un dosage important par rapport le ciment et non pas le liant (ciment + fines). C'est le cas du mortier à 10 et 20% de fines comme substitution avec le ciment.



a)

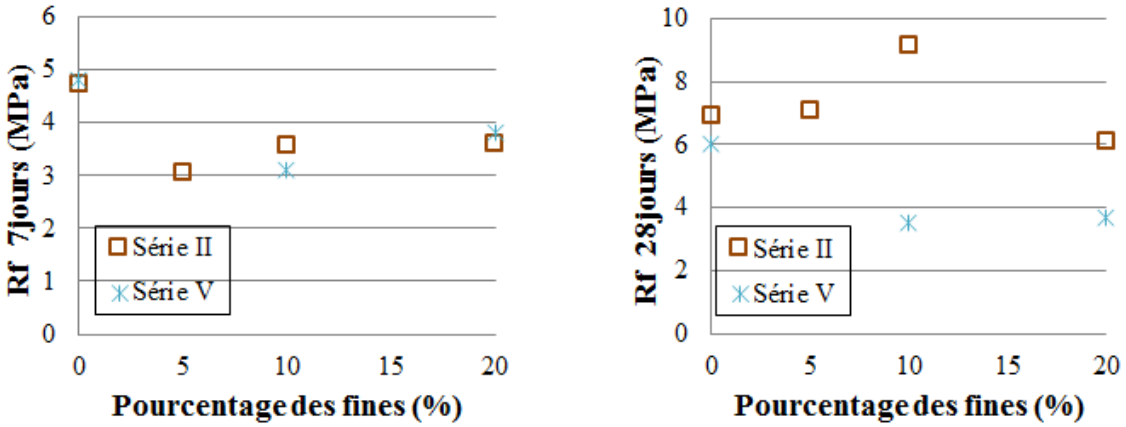


b)

Figure III.16 : Variation de la résistance à la compression : a) à 7 jours et b) à 28 jours de deux séries (II et V) en fonction de pourcentage des fines.

ii) Résistance à la traction par flexion

La Figure III.17 montre les résultats de la résistance mécanique à la flexion, à 7 et à 28 jours, des deux séries sans et avec Sp (Respectivement la série II et la série V). On observe que la résistance à la flexion du mortier avec Sp diminue à 7 et 28 jours en fonction de l'augmentation de fines dans le ciment. Ceci montre que ce type d'adjuvant ne convient pas avec le liant produit à partir de la combinaison (ciment et fines calcaires). A cet effet, il est fortement conseillé de bien choisir le superplastifiant convenable à la matrice cimentaire utilisée.



a) b)

Figure III.17 : Variation de la résistance à la flexion : a) à 7 jours et b) à 28 jours de deux séries (II et V) en fonction de pourcentage des fines.

III.3.6 Effet de la substitution du sable avec les fines Broyées (série VI)

III.3.6.1 Etat frais

Dans cette série, on va essayer de changer le type de fines calcaires en broyant directement le sable de concassage lavé pour avoir des fines calcaire de taille inférieure à 0.080 mm. La Figure III.18 montre l'affaissement des deux séries I et VI dont on a adopté le même protocole de substitution de fines avec le sable. La seule différence réside dans la méthode d'obtention de fines. On peut constater qu'avec des fines broyées directement de sable (FCBDS), l'affaissement est constant. Donc, l'ouvrabilité du mortier n'a été pas affectée par l'augmentation des FCBDS dans le sable. Ce qui représente un résultat tout à fait différent de celui de la série I, dont on a obtenu une diminution de l'affaissement et une perte d'ouvrabilité en fonction de la teneur en fines calcaires dans le sable. Ceci peut être expliqué la propreté des FCBDS de la fraction argileuse qui est omniprésente dans les fines de concassage.

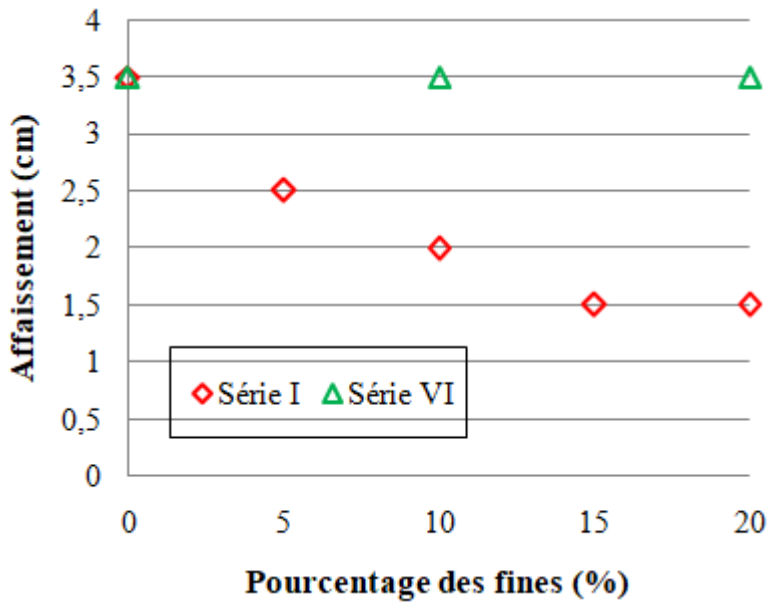
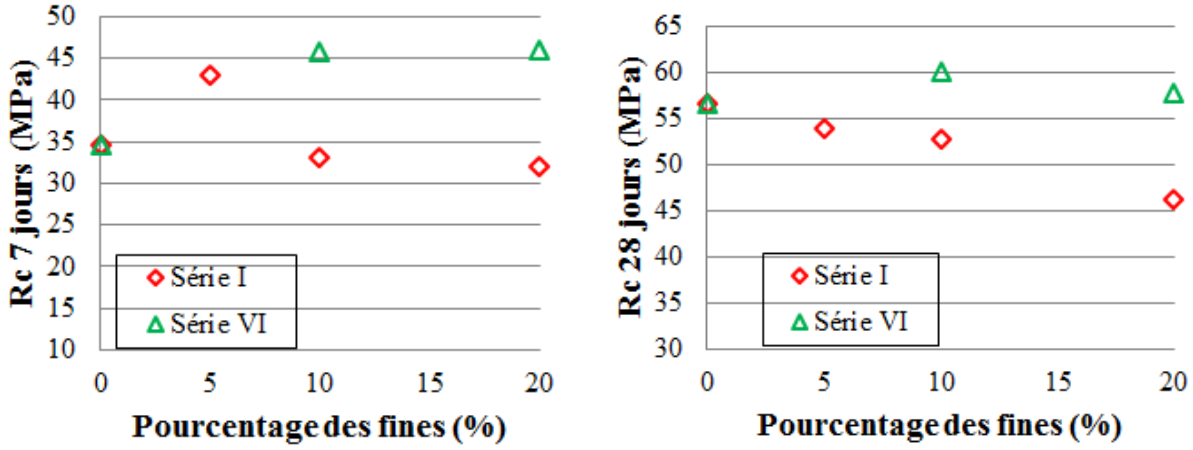


Figure III.18 : Variation de l'affaissement de mortier en fonction du pourcentage des fines broyées directement du sable concassé.

III.3.6.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.16 présente l'évolution de la résistance mécanique à la compression de deux séries (II et V). A travers la Figure III.16.b), on peut voir que la substitution avec les FCBDS induit une amélioration de la résistance à la compression à l'âge de 7 et 28 jours même avec le taux de 20% de FCBDS par rapport à la série I. Ceci est dû de la nature des fines calcaires qui sont plus propre, avec le moindre teneur en argile, par rapport aux fines obtenues directement du sable de concassage. Ce résultat peut également expliquer beaucoup de choses en termes de résultats contradictoires publiés à travers différents travaux de recherche sur l'effet des fines calcaires sur les propriétés mécaniques et même rhéologiques du béton et du mortier de ciment à base des dernières.

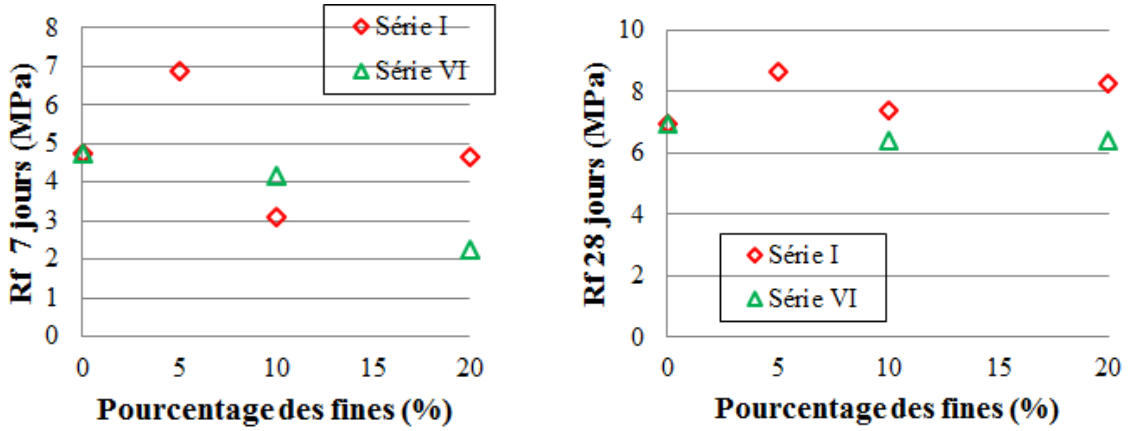


a) Sb)

Figure III.19 : Variation de la résistance à la compression : a) à 7 jours et b) à 28 jours de deux séries (I et VI) en fonction de pourcentage des fines dans le sable.

ii) Résistance à la flexion

La Figure III.20 montre les résultats de la résistance mécanique à la flexion, à 7 et à 28 jours, des deux séries (I et VI). A travers cette figure, une diminution de la résistance à la flexion a été enregistrée pour la série des fines broyées à l'âge de 7 et même 28 jours par rapport à la série I. Par contre, l'évolution de la résistance à la flexion, surtout à 28 jours, en fonction de la teneur en FCBDS montre une stabilité et un effet mineur pour les deux pourcentages étudiés.



a) b)

Figure III.20 : Variation de la résistance à la flexion : a) à 7 jours et b) à 28 jours de deux séries (I et VI) en fonction de pourcentage des fines.

III.3.7 Effet de la méthode d'ajout de l'eau d'absorption (Série VII)

III.3.7.1 Etat frais

Afin de savoir à quel point la méthode de mesure de l'absorption des sables selon les normes EN 1097-6 et ASTM C 128-01 est applicable au sable concassé, dont on a utilisé dans notre travail, on a effectué une série des mortiers un peu différente aux autres séries. On a confectionné une série de cinq mortiers MH, MAb, M1, M2 et M3 avec une quantité d'eau ajoutée préalablement dans le sable pour le mortier MH et elle est ajoutée lors de malaxage pour les autres avec un taux respectivement égale à 3.8, 1.0, 2.0 et 3.0% de la masse du sable utilisé.

La Figure III.21 présente les résultats de la mesure de l'affaissement pour ces différents mortiers. A partir de cet histogramme, on peut constater que l'affaissement avec 3.8% d'eau ajouter initialement dans le sable, pour le mortier MH, donne un affaissement nettement inférieur aux affaissements des autres mortiers même avec 1% d'eau ajoutée. Ce qui confirme le point de vu de quelques chercheurs qui ont estimé la valeur du taux d'absorption mesurée est trop exigée en appliquant par la norme actuelle sur le sable concassé. Autrement dit, la quantité d'eau ajoutée et destinée initialement à l'absorption du sable, ne part pas réellement totalement à cette destination, mais elle va faire partie de la quantité d'eau libre qui va améliorer l'ouvrabilité du mortier. A cet effet, on aura un affaissement plus grand.

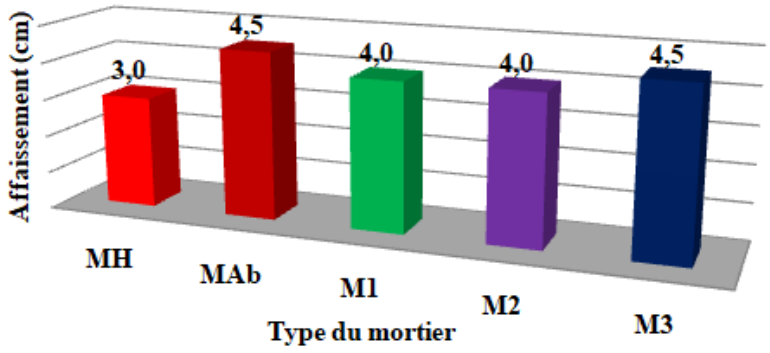


Figure III.21 : Variation de l'affaissement de mortier en fonction du taux d'absorption du sable.

III.3.7.2 Etat durci

Les Figures III.22 et III.23 présentent l'évolution respectivement de la résistance à la compression et à la traction des mortiers déjà décrits dans le paragraphe III.3.7.1.

A partir de ces résultats et selon la méthode développée par Alhozaimy [2009], on peut déduire le taux d'absorption réel du sable de concassage, comme il est indiqué dans la Figure III.24. A cet effet, on peut dire que ce dernier est de l'ordre de 3.04%.

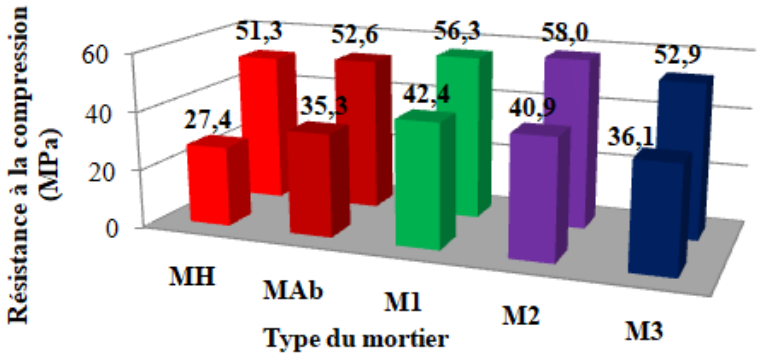


Figure III.22 : Variation de la résistance à la compression à 28 et à 7 jours de mortiers en fonction du taux d'absorption du sable.

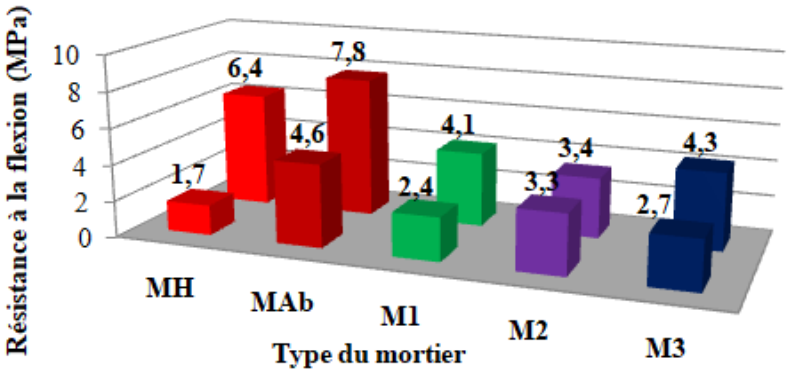


Figure III.23 : Variation de la résistance à la flexion à 28 et à 7 jours de mortiers en fonction du taux d'absorption du sable.

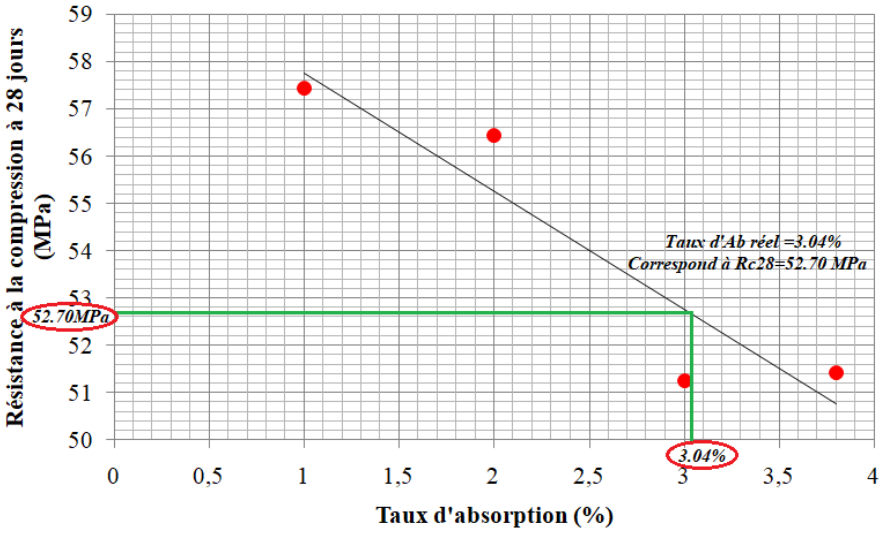


Figure III.24 : Déduction du taux d'absorption du sable de concassage à partir de la résistance mécanique à la compression.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à étudier l'effet de la méthode d'incorporation des fines calcaires sur l'ouvrabilité et la résistance du mortier de ciment. L'analyse des résultats expérimentaux nous ont permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de la mesure de taux d'absorption du sable de concassage montrent que le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines dans le sable.
- La substitution du sable par les fines calcaires (série I) conduit à une diminution de l'affaissement même si qu'on a pris en considération le taux d'absorption du sable, mais avec un affaissement plus grand pour la série III.
- En revanche, l'évolution de l'affaissement en fonction de la substitution du ciment par les fines calcaires quelque soit massique (série II) ou volumique (série IV) reste pratiquement constante.
- Par contre, les résultats de l'augmentation de la teneur en fines dans le ciment avec 1% de superplastifiant (série V) montrent que l'affaissement augmente tout en constatant une ségrégation du mortier surtout avec une teneur élevée de fines.
- La substitution des fines broyées directement du sable concassé avec le sable (série VI) a montré un affaissement constant, ce qui représente un résultat tout à fait différent de celui de la série I.
- Pour la série VII, l'affaissement avec 3.8% d'eau ajoutée initialement dans le sable (mortier MH) donne un affaissement nettement inférieur aux affaissements des autres mortiers même avec 1% d'eau ajoutée.

Concernant les résultats de la résistance mécanique à la compression et à la traction, on peut tirer les points suivants :

- La substitution massique ou volumique des fines calcaires avec le sable ou bien avec ciment ont montré clairement que les fines de concassage affectent négativement la résistance à la compression à 28 jours, notamment pour une teneur de 20%.
- Par contre, la résistance à la compression à 7 jours a montré une certaine amélioration surtout avec une teneur inférieure à 10%.
- Inversement à ce qu'on a obtenu à la compression, la résistance à la traction a montré une amélioration remarquable en fonction de la teneur en fines.
- L'ajout d'un dosage de 1% de superplastifiant pour la substitution du ciment par fines a affecté la résistance quelle que soit à la compression ou à la flexion donc il est fortement conseillé de bien choisir le superplastifiant convenable à la matrice cimentaire utilisée. En plus, lorsque la substitution se fait avec le ciment, il est conseillé de faire le dosage en superplastifiant par rapport au ciment et non pas par rapport au liant (Ciment +Fines) afin d'éviter la ségrégation du matériau obtenu ainsi pour ne pas dépasser le dosage de saturation du superplastifiant.
- La substitution avec des fines calcaires broyés directement du sable concassé lavé (FCBDS) induit une amélioration de la résistance à la compression à l'âge de 7 et 28 jours même avec un taux de 20% de FCBDS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

[Alhozaimy, 2009] A.M. Alhozaimy, Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete » Cement & Concrete Composites 31 470–473, 2009.

[Andrej et Baltazar, 2006] K. Andrej, H. Baltazar (1739/40-1815), the Pioneer of Karst Geomorphologists, Acta Carsologica 35 (2) 163–168, 2006.

[Antoni et al., 2012] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scrivener, Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, Cem. Concr. Res. 42 1579–1589, 2012.

[Arora et al., 2016] A. Arora, G. Sant, N. Neithalath, Ternary blends containing slag and interground/ blended limestone: hydration, strength, and pore structure, Constr. Build. Mater. 102 113–124, 2016.

[Avet et Scrivener, 2018] F. Avet, K. Scrivener, Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of limestone calcined clay cement (LC3), Cem. Concr. Res. 107 124–135, 2018.

[Barsi et al., 2020] A. Di Salvo Barsi, G. Marchetti, M.A. Trezza, E.F. Irassar, Carbonate rocks as fillers in blended cements: physical and mechanical properties, Constr. Build. Mater. 248 118697, 2020.

[Barsi et al., 2020] A. Di Salvo Barsi, M.A. Trezza, E.F. Irassar, Comparison of dolostone and limestone as filler in blended cements, Bull. Eng. Geol. Environ. 79 243–253, 2020.

[Bazzoni, 2014] A. Bazzoni, Study of Early Hydration Mechanisms of Cement by Means of Electron Microscopy (EPFL, PhD Thesis), 2014.

[Benabed, 2016] Benabed, B., Soualhi, H., Belaidi, A. S. E., Azzouz, L., & Kenai, S. 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, 2016.

[Benachour et al., 2008] Y. Benachour, Davy, C. A., Skoczylas, F., &Houari, H. 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, 2008.

[Bentz et al., 2017] D.P. Bentz, P.E. Stutzman, F. Zunino, Low-temperature curing strength enhancement in cement-based materials containing limestone powder, Mater. Struct. 50 173, 2017.

[Bentz, 2006] D.P. Bentz, Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D, Cem. Concr. Compos. 28 124–129, 2006.

[Bentz, 2014] D.P. Bentz, Activation energies of high-volume fly ash ternary blends: hydration and setting, Cem. Concr. Compos. 53 214–223, 2014.

[Berodier et Scrivener, 2014] E. Berodier, K. Scrivener, Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H, J. Am. Ceram. Soc. 97 3764–3773, 2014.

[Bonavetti et al., 2001] V.L. Bonavetti, V.F. Rahhal, E.F. Irassar, Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements, Cem. Concr. Res. 31 853–859, 2001.

[Bonavetti et al., 2003] V. Bonavetti, H. Donza, G. Men´endez, O. Cabrera, E.F. Irassar, Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy, Cem. Concr. Res. 33 865–871, 2003.

[Cao et al., 2019] M.cao, Mingli, MING, Xing, HE, Kaiyu, *et al.* Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review. *Materials*, , vol. 12, no 5, p. 781, 2019.

[Cao et al., 2019] M. Cao, X. Ming, K. He, L. Li, S. Shen, Effect of macro-, micro- and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—a review, Materials (Basel). 12, 2019.

[Chen et al., 2016] J.J. Chen, A.K.H. Kwan, P.L. Ng, L.G. Li, Packing density improvement through addition of limestone fines, superfine cement and condensed silica fume, J. Mater. Sci. Chem. Eng. 29–36, 2016.

[Chen et Kwan, 2017] L.G. Li, J.-J. Chen, A.K.H. Kwan, Roles of packing density and water film thickness in strength and durability of limestone fines concrete, Mag. Concr. Res. 69 595–605, 2017.

[Chowaniec, 2012] O. Chowaniec, Limestone Addition in Cement, Ph.D. thesis, EPFL, https://info science.epfl.ch/record/174700, 2012.

[Courard et Michel, 2014] L. Courard, F. Michel, Limestone fillers cement based composites: effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties, Constr. Build. Mater. 51 439–445, 2014.

[Damidot et al., 1994] D. Damidot, S. Stronach, A. Kindness, M. Atkins, F.P. Glasser, Thermodynamic investigation of the CaOAl2O3CaCO3H2O closed system at 25 ◦C and the influence of Na2O, Cem. Concr. Res. 24 563–572, 1994.

[Damineli et al., 2018] V.M. John, B.L. Damineli, M. Quattrone, R.G. Pileggi, Fillers in cementitious materials — experience, recent advances and future potential, Cem. Concr. Res. 1–14, 2018.

[Dhandapani et al., 2016] Y. Dhandapani, A. Kulkarni, M. Santhanam, Electrical conductivity based evaluation of solid-phase growth and microstructural evolution in multi-component cementitious systems, in: 3rd Int. Conf. Microstruct. Relat. Durab. Prop. Cem. Compos, pp. 1–12, 2016.

[Dhandapani et al., 2021] Y. Dhandapani, , M Santhanam, , KALADHARAN, Gopakumar, *et al.* Towards ternary binders involving limestone additions—A review. *Cement and Concrete Research*, vol. 143, p. 106396, 2021.

[Dhandapani et Santhanam, 2020] Y. Dhandapani, M. Santhanam, Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination, Cem. Concr. Res. 129 105959, 2020.

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

[Feng et al., 2016] P. Feng, C. Miao, J.W. Bullard, Factors influencing the stability of AFm and AFt in the Ca-Al-S-O-H system at 25 ◦C, J. Am. Ceram. Soc. 99 1031–1041, 2016.

[Guemmadi, 2009] Z. Guemmadi, Resheidat, M., Chabil, H., &Toumi, BModeling the influence of limestone filler on concrete: A novel approach for strength and cost. Jordan Journal of Civil Engineering, 3(2), 158-171, 2009.

[Huang et al., 2017] W. Huang, H. Kazemi-Kamyab, W. Sun, K. Scrivener, Effect of replacement of silica fume with calcined clay on the hydration and microstructural development of eco-UHPFRC, Mater. Des. 121 36–46, 2017.

[Hudson, 1997] B.P, Hudson, “Manufactured Sand – Destroying Some Myths,” Quarry, pp. 57-62, October, 1997.

[Kakali et al., 2000] G. Kakali, S. Tsivilis, E. Aggeli, M. Bati, Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO3, Cem. Concr. Res. 30 1073–1077, 2000.

[Kasaniya et al., 2019] M. Kasaniya, M.D.A. Thomas, E.G. Moffatt, Development of rapid and reliable pozzolanic reactivity test method, ACI Mater. J. 116 145–154, 2019.

[Knop et Peled, 2016] Y. Knop, A. Peled, Packing density modeling of blended cement with limestone having different particle sizes, Constr. Build. Mater. 102 44–50, 2016.

[Krishnan et al., 2018] S. Krishnan, S.K. Kanaujia, S. Mithia, S. Bishnoi, Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay, Constr. Build. Mater. 164 265–274, 2018.

[Krishnan et al., 2019] S. Krishnan, A.C. Emmanuel, S. Bishnoi, Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone, Constr. Build. Mater. 222 64–72, 2019.

[Krishnan et Bishnoi, 2018] S. Krishnan, S. Bishnoi, Understanding the hydration of dolomite in cementitious systems with reactive aluminosilicates such as calcined clay, Cem. Concr. Res. 108 116–128, 2018.

[Kucharczyk et al., 2015] S. Kucharczyk, M. Zajac, J. Deja, The influence of limestone and Al2O3 content in the slag on the performance of the composite cements, in: Procedia Eng, Elsevier B.V., pp. 402–409, 2015.

[Kumar et al., 2017] A. Kumar, T. Oey, G. Falzone, J. Huang, M. Bauchy, M. Balonis, N. Neithalath, J. Bullard, G. Sant, The filler effect: the influence of filler content and type on the hydration rate of tricalcium silicate, J. Am. Ceram. Soc. 1–13, 2017.

[Kunther et al., 2016] W. Kunther, Z. Dai, J. Skibsted, Thermodynamic modeling of hydrated white Portland cement–metakaolin–limestone blends utilizing hydration kinetics from 29Si MAS NMR spectroscopy, Cem. Concr. Res. 86 29–41, 2016.

[Lothenbach et al., 2008] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, K. Scrivener, Influence of limestone on the hydration of Portland cements, Cem. Concr. Res. 38 848–860, 2008.

[Marzouk et Lecomte, 2013] A. Marzouki, A. Lecomte, Properties of concrete mixed with Portland-limestone cement of different grinding qualities, J. Mater. Civ. Eng. ASCE 29 1–9, 2013.

[Matschei et al., 2007] T. Matschei, B. Lothenbach, F.P. Glasser, The role of calcium carbonate in cement hydration, Cem. Concr. Res. 37 551–558, 2007.

[Menadi et al., 2009] B. Menadi, S, Kenai, Khatib, J., & Aït-Mokhtar, A.Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. Construction and Building Materials, 23(2), 625-633, 2009.

[NCSA, 1976] National Crushed Stone Association, “Stone Sand for Portland Cement,” Concrete Materials, pp. 12, February, 1976.

[Oey et al., 2013] T. Oey, A. Kumar, J.W. Bullard, N. Neithalath, G. Sant, The filler effect: the influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates, J. Am. Ceram. Soc. 96 1978–1990, 2013.

[P´era et al., 1999] J. P´era, S. Husson, B. Guilhot, Influence of finely ground limestone on cement hydration, Cem. Concr. Compos. 21 99–105, 1999.

[Palm et al., 2016] S. Palm, T. Proske, M. Rezvani, S. Hainer, C. Müller, C.-A. Graubner, Cements with a high limestone content — mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete, Constr. Build. Mater. 119 308–318, 2016.

[Poppe et Schutter, 2005] A.M. Poppe, G. De Schutter, Cement hydration in the presence of high filler contents, Cem. Concr. Res. 35 2290–2299, 2005.

[Puerta-Falla et al., 2015] G. Puerta-Falla, M. Balonis, G. Le Saout, G. Falzone, C. Zhang, N. Neithalath, G. Sant, Elucidating the role of the aluminous source on limestone reactivity in cementitious materials, J. Am. Ceram. Soc. 98 (2015) 4076–4089.

[Puerta-Falla et al., 2016] G. Puerta-Falla, M. Balonis, G. Le Saout, A. Kumar, M. Rivera, G. Falzone, N. Neithalath, G. Sant, The influence of slightly and highly soluble carbonate salts on phase relations in hydrated calcium aluminate cements, J. Mater. Sci. 51 6062–6074, 2016.

[Ramezanianpour et al., 2014] A.M. Ramezanianpour, R.D. Hooton, A. Mohammad, R.D. Hooton, A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs, Cem. Concr. Compos. 51 1–13, 2014.

[Sadhouari et al., 2009] F. Sadhouari , N. Goufi, .A Guezzouli, 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), 2009.

[Safiddine et al., 2017] S. Safiddine, Debieb, F. Kadri, E. H., Menadi, B., & Soualhi, H.. Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar. Applied Rheology, 27(1), 2017.

[Safiddine, 2018] S. Safiddine, 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.

[Safiddine, 2021.a] S. Safiddine, Amokrane K., Debieb F., et al. How quarry waste limestone filler affects the rheological behavior of cement-based materials. Applied Rheology, vol. 31, no 1, p. 63-75, 2021.

[Safiddine, 2021.b] S. Safiddine, H. Soualhi, K. Amokrane, F. Debieb, Belaidi A. S-E., Kadri E. H.,The double effect of limestone fillers on the rheological behavior of cement mortar. Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism Vol. 5 Nr. 6, 69-79, 2021.

[Scherer et Bellmann, 2018] G.W. Scherer, F. Bellmann, Kinetic analysis of C-S-H growth on calcite, Cem. Concr. Res. 103 226–235, 2018.

[Scrivener et al., 2015] K. Scrivener, L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. Advances in understanding hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, 78, 38-56, 2015.

[Tennis et al., 2011] P.D. Tennis, M.D. a Thomas, W.J. Weiss, State-of-the-art report on use of limestone in cements at levels of up to 15%, Portl. Cem. Assoc. 1–78, 2015.

[Tsivilis et al., 1998] S. Tsivilis, G. Kakali, E. Chaniotakis, A. Souvaridou, A study on the hydration of Portland limestone cement by means of TG, J. Therm. Anal. 52 863–870, 1998.

[Tsivilis et al., 2017] Q. Wang, J. Yang, H. Chen, Long-term properties of concrete containing limestone powder, Mater. Struct. 50 1–13, 2017.

[Tydlit´at et al., 2014] V. Tydlit´at, T. Matas, R. ˇCerný, Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement, Constr. Build. Mater. 50 140–147, 2014.

[Wang et al., 2018.a] D. Wang, C. Shi, N. Farzadnia, Z. Shi, H. Jia, Z. Ou, A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures, Constr. Build. Mater. 181 659–672, 2018.

[Wang et al., 2018.b] D. Wang, C. Shi, N. Farzadnia, Z. Shi, H. Jia, A review on effects of limestone powder on the properties of concrete, Constr. Build. Mater. 192 153–166, 2018.

[Wang et al., 2018.c] D. Wang, Dehui, C. Shi, N.Farzadnia, *et al.* A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, vol. 181, p. 659-672, 2018.

[WBCSD, 2018] WBCSD, IEA, Technology Roadmap: Low-carbon Transition in the Cement Industry, 2018.

[Weerdt et al., 2011] K. De Weerdt, M. Ben Haha, G. Le Saout, K.O.O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach, Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash, Cem. Concr. Res. 41 279–291, 2011.

[Zajac et al., 2018] M. Zajac, P. Durdzinski, C. Stabler, J. Skocek, D. Nied, M. Ben Haha, Influence of calcium and magnesium carbonates on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of metakaolin containing composite cements, Cem. Concr. Res. 106 91–102, 2018.

[Zunino et Scrivener, 2019] F. Zunino, K.L. Scrivener, The influence of the filler effect in the sulfate requirement of OPC and blended cements, Cem. Concr. Res. 126 105918, 2019.