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 l'argile calcinée et du filler calcaire sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique du mortier de ciment

---

Présenté par

ZAOUI Rima

HADDAD Ines Soumia

Proposé et Dirigé par

Mr. SAFIDDINE Salim

Mlle. BENMOUSSA Yousra

Promotion Juin 2023

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le fruit des efforts fournis et des sacrifices consentis par plusieurs personnes que, nous ne pourrons oublier de remercier.

Nous tenons remercier d'abord à Dieu, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Nous tenons à remercier **Dr. SAFIDDINE Salim**, d'avoir accepté nous encadrer et pour ses conseils, sa disponibilité et ses encouragements qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Un grand merci à pour la Doctorante **BENMOUSSA Yousra**, pour son aide pratique et son soutien moral et son encouragement.

Aussi, nous remercions les membres de jury pour avoir accepté examiner notre mémoire.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall technologique surtout : Mr. Hadjadj Moussa, Mr. Toumi Youcef, Mlle. Kaother.

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

Dédicaces

Je dédie entièrement ce travail à ma mère merci pour ta présence, soutien, aide financière, et surtout l'amour, merci de n'avoir jamais douté de moi.

Tout ce que j'espère, c'est que tu es fier de moi aujourd'hui.

À la personne la plus idéale qui fut dans ce monde je dédie ce travail, c'est vrai qu'elle n'est pas avec nous pour récolter le fruit de ses sacrifices, mais, elle reste toujours la plus présente, à l'âme de mon grand-père SAAD qui a fait de moi ce que je suis.

À mon cher frère LOUAI et à la meilleure des sœurs MARIA, qui font de mon univers une merveille, je leurs souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.

À mes oncles HATEM, HAITEM et DJAMEL, pour leur soutien et leur tendresse.

À tous ceux qui m'aiment, je les remercie tous.

HADDAD Ines

Dédicaces

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

Je dédie mon succès à mon cher père que la miséricorde de dieu à lui, à ma mère qui était toujours à mes côtés.

Mon cher frère « **Hakim** » qui est comme mon père. Grâce à toi, je suis arrivé là où je suis aujourd'hui, dieu soit loué. Je te remercie du fond du cœur, tant que tu es une lumière qui illumine tout le monde univers.

Je remercie mon frère **DJAMEL**, **BACHIR** avec mes sœurs **RATIBA**, **ASIA**, **SAMIRA**, **ICHRAK, SOUMIA, NAWAL** pour leur encouragement.

A tous mes amis surtout **« YASMIN, LAMYA, MERIEM, INES**, **FOUAD**, **ISLAM**, **AYOUB**, **HAKIM**, **ABDELMONAIM**. Qu'avec lesquelles j'ai partagé de très bon moments à l'université, et qu'ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

ZAOUI rima

ملخص

يوفر الأسمنت من الطين المكلس والحجر الجيري مزايا اقتصادية وبيئية لا يمكن إنكارها. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير هذا الأسمنت على قابلية التشغيل والقوة الميكانيكية لملاط الأسمنت. ولهذه الغاية ، تم إنتاج تسع سلاسل من الملاط وفقًا لمحتوى الطين المكلس ، وحشو الحجر الجيري ، وطبيعة الرمل وإضافة مادة اللدائن الفائقة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هذا الأسمنت يؤثر على قابلية عمل الملاط عن طريق زيادة وقت التدفق في مقياس قابلية التشغيل. ومع ذلك ، فإن استبدال الأسمنت بنسبة 10٪ من الطين المكلس و 10٪ من الحشو الكلسي يمكن اعتباره هو الحل الأمثل لطيننا. ومع ذلك ، فإن استبدال 30٪ من الطين المكلس و 10٪ من حشو الحجر الجيري يعطي قوة أكبر من 75٪ من قوة ملاط التحكم. من ناحية أخرى ، يبدو أن التكليس عند 800 درجة مئوية لمدة 3 ساعات هو الأمثل لهذا الطين. وبالتالي ، فإن استخدام الرمل الجيري المسحوق يوضح أن استبدال 10٪ من الأسمنت بالطين المكلس يحسن المقاومة الميكانيكية. أخيرًا ، أعطى استخدام الملدن الفائق المعتمد على الإيثر متعدد الكابوكسيل قابلية تشغيل أفضل مقارنةً بالملدن الفائق المعتمد على البوليمر المشترك الأكريليكي. وبالتالي ، فإن التحسن في قابلية عمل الملاط تسبب في زيادة أكثر من 8 ميجا باسكال في مقاومة الانضغاط في 28 يومًا مقارنة بالمونة التي لا تحتوي على مادة ملدنة فائقة.

الكلمات المفتاحية: الطين المكلس ، حشو الحجر الجيري ، الملاط ، قابلية التشغيل ، وقت التدفق ، المقاومة الميكانيكية.

Résumé

Le ciment de l'argile calcinée et du calcaire (LC3) offre des avantages économiques et environnementaux incontestables. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence du LC3 sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique du mortier de ciment. A cet effet, on a réalisé neuf séries de mortiers en fonction de la teneur en argile calcinée (AC), du filler calcaire (FC), de la nature du sable et de l'ajout du superplastifiant (Sp).

Les résultats obtenus montrent que le LC3 affecte l'ouvrabilité du mortier en augmentant le temps d'écoulement au maniabilimètre. Cependant, la substitution du ciment par 10% d'AC et 10% du FC peut être considérée comme l'optimale pour notre argile. Toutefois, la substitution de 30% d'AC et de 10% du FC donne une résistance supérieure à 75% de la résistance du mortier témoin. En revanche, la calcination à 800 °C pendant 3 heures semble être l'optimale pour cette argile. Ainsi, l'utilisation du sable concassé calcaire (SC) montre que la substitution de 10% du ciment par l'AC améliore la résistance mécanique. Finalement, l'utilisation du superplastifiant (Sp) à base d'étherpolycaboxylique a donné une meilleure ouvrabilité par rapport au Sp à base de copolymère acrylique. Ainsi, l'amélioration de l'ouvrabilité du mortier a provoqué une augmentation de plus de 8MPa de la résistance à la compression à 28 jours par rapport au mortier LC3 sans Sp.

Mots clés : Argile calcinée, Fillers calcaires, Mortier, Ouvrabilité, Temps d'écoulement, Résistance mécanique.

Summary

The cement of calcined clay and limestone (LC3) offers undeniable economic and environmental advantages. The main objective of this work is to study the influence of LC3 on the workability and mechanical strength of cement mortar. To this end, nine series of mortars were produced according to the calcined clay content (AC), the limestone filler (FC), the nature of the sand, the addition of the superplasticizer (Sp).

The results obtained show that the LC3 affects the workability of the mortar by increasing the flow time at the workability meter. However, the substitution of cement by 10% of AC and 10% of FC can be considered as the optimal for our clay. However, the substitution of 30% of AC and 10% of FC gives a resistance greater than 75% of the resistance of the control mortar. On the other hand, calcination at 800°C for 3 hours seems to be optimal for this clay. Thus, the use of calcareous crushed sand (SC) shows that the substitution of 10% of the cement by CA improves the mechanical resistance. Finally, the use of superplasticizer (Sp) based on polycaboxylic ether gave better workability compared to Sp based on acrylic copolymer. Thus, the improvement in the workability of the mortar caused an increase of more than 8MPa in the compressive strength at 28 days compared to the LC3 mortar without Sp.

Keywords: Calcined clay, Limestone fillers, Mortar, Workability, Flow time, Mechanical resistance.

TABLES DES MATIERE

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Symboles et Abréviation

Introduction général 01

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1 Introduction 03

I.2 Définitions 03

I.2.1 Argiles 03

I.2.2 Fillers calcaires 04

I.2.3 Activités hydraulique et pouzzolanique 05

I.2.4 Réaction pouzzolanique 05

I.3 Historique de l'utilisation des ciments argile calcinée calcaire (LC3) 06

I.4 Composition et chimie de LC3 06

I.5 Norme 09

I.6 Activation thermique de l'argile 09

I.7 Influence de l'argile calcinée sur l'ouvrabilité 11

I.8 Influence de superplastifiant sur l'ouvrabilité 12

I.9 Influence de l'argile calcinée sur la résistance mécanique 15

I.10 Avantages environnementaux de l'utilisation de l'argile calcinée comme SCM 20

I.11 Conclusion 21

Chapitre II : Protocole expérimentale

II.1. Introduction 22

II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés 22

II.2.1 Le Ciment 22

II.2.2 Granulats 24

II.2.2.1 Sable roulé 24

II.2.2.2 Sable concassé 25

II.2.3 Fillers calcaires 26

II.2.4 Argile calcinée 27

II.2.5 Adjuvant superplastifiant 29

II.2.6 Eau de gâchage 30

II.3 Préparation des mélanges 30

II.4. Description des mélanges et désignation 31

II.4.1 Le mortier 31

II.5. Méthode d'essais 34

II.5.1 Essais effectués sur le sable 34

II.5.1.1 Equivalent de sable 34

II.5.1.2 Analyse granulométrique 34

II.5.1.3 Module de finesse 35

II.5.1.4 Masse volumique 35

II.5.1.5 Surface Spécifique 36

II.5.2 Essais effectués sur mortier frais 36

II.5.2.1 Essais de consistance 36

II.5.2.2 Essai mesure des temps de début et de fin de prise 38

II.5.2.3 Essai au Maniabilimètre 39

II.5.2.4 Mesure de l'affaissement 41

II.5.3 Essais réalisés à l'état durci 42

II.5.3.1 Essais de traction par flexion EN 196-1 42

II.5.3.2 Essai de compression 42

Chapitre III : Résultats et Interprétation

III.1 Introduction 44

III.2 Etude préliminaire sur les matériaux utilisés 44

III.2.1 Mesure des caractéristiques physico-chimiques 44

III.2.2 Mesure de la finesse Blaine de l'argile calcinée et filler calcaire 44

III.2.3 Mesure de la demande en eau pour la consistance normalisée et le début de prise et la fin de prise du ciment et LC3 45

III.2.4 Mesure de la perte au feu 45

III.3 Effet de l'argile calcinée et du filler calcaire sur les propriétés du mortier 46

III.3.1 Influence du type d'argile et du type de calcaire (série I) 46

III.3.1.1 Etat frais 47

III.3.1.2 Etat durci 47

III.3.2 Effet de la température de calcination (série II) 49

III.3.2.1 Etat frais 49

III.3.2.2 Etat durci 50

III.3.3 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC sans FC (série III) 51

III.3.3.1 Etat frais 51

III.3.3.2 Etat durci 52

III.3.4 Effet de la substitution massique du ciment par le FC sans AC (série IV) 54

III.3.4.1 Etat frais 54

III.3.4.2 Etat durci 54

III.3.5 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC avec 5% du FC (série V) 56

III.3.5.1 Etat frais 56

III.3.5.2 Etat durci 56

III.3.6 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC avec 10% du FC (SérieVI) 58

III.3.6.1 Etat frais 58

III.3.6.2 Etat durci 59

III.3.7 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC avec 15% du FC (Série VII).....60

III.3.7.1 Etat frais 60

III.3.7.2 Etat durci 61

III.3.8 Effet de l'argile calcinée sur les propriétés du mortier à base du sable concassé calcaire (série VIII).....63

III.3.8.1 Etat frais 63

III.3.8.2 Etat durci 63

III.3.9 Effet du superplastifiant (série IX) 65

III.3.9.1 Etat frai.....65

III.3.9.2 Etat durci 67

Conclusion générale.....69

Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure I.1 : Formule chimique et structure de (a) la kaolinite, (b) l'illite et (c) la montmorillonite et (d) Muscovite 04

Figure I.2 : Gel de C-S-H b) Portlandite 06

Figure I.3 : Comparaison de la composition de l'OPC et du LC3 07

Figure I.4 : Comparaison entre (à gauche) les émissions de CO_2 et (à droite) le coût de production de l'OPC par rapport au LC3.....08

Figure I.5 : Diagramme triangulaire présente les domaines d'existence de nouveaux ciments 09

Figure I.6 : Temps de séjour en fonction de la température d'activation optimale pour la marne étudiée utilisée comme SCM.....11

Figure I.7 : Facteur de déformabilité caractéristique des mortiers normalisés à base de LC2 et FA 12

Figure I.8 : Evolution de la viscosité des pâtes à la dose de saturation en a) PCE et SNF avec E/C=0,35 13

Figure I.9 : Evolution de la viscosité des pâtes à la dose de saturation en a) PCE et SNF avec E/C=0,40 14

Figure I.10 : Corrélation entre le dosage de saturation en PCE des pâtes et le dosage en PCE de bétons correspondants ayant un affaissement de 19±1cm.....14

Figure I.11 : Teneur en eau et dosage en Sp PCE requis pour les bétons étudiés 15

Figure I.12 : Evolution de la résistance à la compression du mortier aux différents âges.....16

Figure I.13 : Comparaison de l'indice d'énergie grise (EI), de l'indice d'émission de carbone (CI) et de l'indice du coût des matériaux (COST) par unité de résistance à la compression dans les ciments mélangés à 28 jours.....16

Figure I.14 : Résistance à la compression à 28 jours des mélanges de mortier contenant 15 % en poids de kaolin brut et calciné 17

Figure I.15 : Résistance à la compression des mortiers à différents âges et différentes températures de calcination de LC3 17

Figure I.16 : Résistance à la compression de LC3-50 en fonction de la teneur en kaolinite calcinée. Les lignes pointillées indiquent les points forts du OPC 18

Figure I.17 : Résistance à la compression de mortier à différents âges pour différents niveaux de remplacement du ciment par LC2 19

Chapitre II : Protocole expérimentale

Figure II.1 : Ciment utilisé : CEM I42.5R 23

Figure II.2 : Sable siliceux d'Oued-Souf 24

Figure II.3 : Sable concassé lavé 25

Figure II.4 : Courbes granulométriques du sable roulé (SR) et du sable concassé (SC5) 26

Figure II.5 : Fillers calcaires utilisés (FCG et FCB) 27

Figure II.6: Etapes de préparation du filler calcaire 27

Figure II.7 : Etapes de préparation et le protocole expérimental de la calcination de l'argile. 28

Figure II.8 : Adjuvants superplastifiants utilisés TEMPO-10 et GLENIUM-SKY 537 29

Figure II.9 : Malaxeur utilisé 31

Figure II.10 : Mélanges utilisés 32

Figure II.11 : Essai d'équivalent de sable 34

Figure II.12 **:** Tamiseuse électrique 35

Figure II.13 : Mesure de la masse volumique 35

Figure II.14 : Détermination de la surface spécifique du ciment, de l'AC et du FC 36

Figure II.15 : Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance 38

Figure II.16 : Détermination du temps de prise 39

Figure II.17 : Maniabilimètre 40

Figure II.18 : Mesure de l'affaissement 41

Figure II.19 : Essais en flexion 42

Figure II.20 : Essais de compression 43

Chapitre III : Résultats et Interprétation

Figure III.1 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du type d'argile calcinée (AC1/ AC2) et du type de filler calcaire (FCB/FCG) 47

Figure III.2 : Evolution de la résistance à la compression du mortier, à 7 et à 28 jours, en fonction du type de l'AC (AC1/ AC2) et du FC (FCB/FCG) 48

Figure III.3 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du mortier, à 7 et à 28 jours, en fonction du type de l'AC (AC1/ AC2) et du FC (FCB/FCG).....49

Figure III.4 : Evolution du temps d'écoulement en fonction de la température de calcination 49

Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la température de calcination.....50

Figure III.6 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la température de calcination 51

Figure III.7 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment sans FC.....52

Figure III.8 : Evolution de la résistance relative à la compression du mortier en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment sans FC 53

Figure III.9 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment sans FC 53

Figure III.10 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage du FC dans le ciment sans AC 54

Figure III.11 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage du FC dans le ciment, sans AC 55

Figure III.12 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage du FC dans le ciment, sans AC.....55

Figure III.13 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC avec 5% du FC.....56

Figure III.14 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de pourcentage de l'AC avec 5% du FC 57

Figure III.15 : Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de pourcentage de l'AC avec 5% du FC 57

Figure III.16 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC.....58

Figure III.17 : Evolution de la résistance relative à la compression des mortiers en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC.....59

Figure III.18 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC.....60

Figure III.19 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC.....60

Figure III.20 : Evolution de la résistance relative à la compression des mortiers en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC.....61

Figure III.21 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC.....62

Figure III.22 : Evolution du temps d'écoulement en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du sable concassé calcaire 63

Figure III.23 : Evolution de la résistance relative à la compression en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du sable concassé calcaire 64

Figure III.24 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du sable concassé calcaire 65

Figure III.25 : Evolution de l'affaissement des mortiers avec superplastifiant.....66

Figure III.26 : Etat du mortier avec a) 1% du Sp1 et b) 0,8% de Sp1 66

Figure III.27 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec superplastifiant 67

Figure III.28 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec superplastifiant 68

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Protocole expérimentale

Tableau II.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment 23

Tableau II.2 : Propriétés physiques d'identification de sable siliceux d'Oued-Souf.....24

Tableau II.3 : Analyses chimique du sable utilisé 25

Tableau II.4 : Analyses physique du sable utilisé.....25

Tableau II.5 : propriétés physiques du filler calcaire.....27

Tableau II.6 : Propriétés physiques d'argile calcinée 29

Tableau II.7 : Récapitulation des opérations de malaxage.....30

Tableau II.8: Compositions des mortiers confectionnés 33

Tableau II.9 : Essais de caractérisation sur mortier à l'état durci.....42

Chapitre III : Résultats et Interprétation

Tableau III.1 : Propriétés Physico-chimiques de l'argile calcinée et du filler calcaire 44

Tableau III.2 : Propriétés Physico-chimiques du ciment et de l'AC1 et du FC gris 45

Tableau III.3 : Consistance et temps de prise du ciment.....45

Tableau III.4 : Perte au feu et taux de calcite dans l'argile A1 46

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Ab	Absorption (%)
AC	Argile calcinée
ES	Equivalent du sable
E/C	Rapport Eau/Ciment
FC	Filler calcaire
LC2	Argile calcinée et calcaire
LC3	Ciment d'argile calcinée et du calcaire
Mf	Module de finesse
MK	Métakaolin
OPC	Ciment Portland ordinaire
PCE	Etherpolycarboxylique
$\mathbf{R_c}$	Résistance à la compression
$\mathbf{R_f}$	Résistance à la flexion
SC	Sable concassée
SCM	Matériaux cimentaires supplémentaires
SP	Superplastifiant
SR	Sable roulé
SSB	Surface spécifique de Blaine

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La production de ciment contribue de manière significative aux émissions de carbone. Le ciment est produit en chauffant du calcaire et d'autres matières premières dans un four à haute température, ce qui nécessite une quantité importante d'énergie. Ce processus libère de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) et de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, provenant à la fois de la combustion de combustibles fossiles pour fournir l'énergie nécessaire et de la réaction chimique du calcaire pour produire le ciment. Pour résoudre ce problème, l'industrie cimentière explore différentes stratégies pour réduire son empreinte carbone. Ces stratégies comprennent :

- Combustibles et matières premières alternatifs : les entreprises cimentières explorent l'utilisation de combustibles alternatifs, tels que la biomasse et les déchets. Ainsi que les matières premières alternatives, telles que les sous-produits de déchets industriels.
- Capture du carbone : Une autre stratégie explorée est la capture du carbone, qui consiste à capturer les émissions de CO_2 du processus de production de ciment et à les stocker sous terre ou à les utiliser pour d'autres processus industriels.
- Efficacité énergétique : les entreprises cimentières étudient également des moyens d'améliorer l'efficacité énergétique du processus de production du ciment, comme l'utilisation de fours plus efficaces et l'amélioration de l'isolation du four.

En effet, ces solutions sont très couteuses, notamment pour les pays en développement. A cet effet, la dernière solution qui reste, consiste à développer des nouveaux types du ciment avec moins d'énergie de production en remplaçant le clinker par d'autres matériaux cimentaires supplémentaires (SCM), sous condition qu'ils sont localement disponibles en quantité suffisante sans nuire l'environnement.

L'utilisation de MCS a un énorme potentiel pour réduire les émissions de carbone et la consommation de ressources vierges dans la production du ciment dans le monde tout en améliorant les performances mécaniques et la durabilité du béton. Les ajouts cimentaires les plus utilisés aujourd'hui pour réduire le facteur clinker dans le ciment sont les fillers calcaires, les cendres volantes et le laitier de hauts fourneaux. Cependant, la carence des SCM dans de nombreux pays est un obstacle à leur utilisation plus large. En revanche, les argiles calcinées en combinaison avec des fillers calcaires (LC2) ont un potentiel énorme pour étendre

l'utilisation des matériaux cimentaires supplémentaires en remplacement partiel du clinker dans le ciment. La valorisation de tel type d'ajout présente un point très avantageux vue la disponibilité des gisements d'argile presque partout dans notre région avec un coût très bas.

Le développement d'un ciment d'argile calcinée et du filler calcaire (LC3) conduit à réduire la quantité de clinker nécessaire, qui est le principal composant du ciment Portland traditionnel. La production de ciment LC3 a une empreinte carbone inférieure à celle du ciment traditionnel, ce qui en fait une alternative plus durable. Le ciment LC3 a été utilisé dans des projets de construction dans plusieurs pays, dont l'Inde, Cuba et la Colombie. Il a montré de bonnes propriétés mécaniques et une bonne durabilité.

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'influence de l'argile calcinée et du filler calcaire sur les propriétés du mortier de ciment à l'état frais et à l'état durci en mesurant l'évolution de l'ouvrabilité et la résistance mécanique en fonction de taux de substitution de LC2 par le ciment Portland ordinaire (OPC). Dans ce manuscrit, on va adopter la structure suivante :

Après une introduction générale, ce manuscrit contient trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à une synthèse bibliographique sur le LC3. Le deuxième chapitre présente le programme expérimental adopté, les matériaux et les équipements utilisés 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

Cependant, l'utilisation de SCM pour remplacer une partie du clinker dans le ciment est la stratégie la plus efficace pour réduire les émissions de CO_2 dans l'industrie cimentière mondiale. Parmi les matériaux disponibles en quantités nécessaires pour répondre à la demande industrielle, il y a l'argile, qui peut être calcinée pour produire un SCM efficace. Ces argiles sont largement disponibles dans les pays où l'on prévoit la plus forte croissance de la demande de ciment et en particulier en Algérie.

Les argiles calcinées ont déjà été utilisées comme pouzzolanes, mais la calcination rend l'économie de substitution marginale dans un mélange pouzzolanique conventionnel. L'innovation majeure présentée ici est la possibilité d'effectuer une substitution couplée du ciment par de l'argile calcinée et du filler calcaire. Cela permet des niveaux de substitution beaucoup plus élevés. La combinaison d'argile calcinée et de calcaire permet des niveaux de substitution plus élevés jusqu'à des teneurs en clinker d'environ 50 % avec des propriétés mécaniques similaires et une amélioration de certains aspects de la durabilité. Le remplacement du clinker par du calcaire dans ces mélanges réduit à la fois le coût et l'impact environnemental.

Dans ce chapitre, on vise à mettre en évidence la littérature relative aux différents types d'argile utilisés, et à se concentrer en particulier sur la formulation, l'utilisation et l'efficacité du LC2, en vue de suggérer les paramètres optimaux qui assureront leur compatibilité avec d'autres composants des matériaux cimentaires.

I.2 Définitions

I.2.1 Argiles

Deux définitions du terme "argile" coexistent [Site web1] :

- La première définition est granulométrique : le terme argile correspond à l'ensemble des minéraux inférieurs à 2 µm dans une roche. Sous cette définition, se retrouvent donc les argiles minéralogiques, mais aussi des débris de quartz, de la silice, des oxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des cristaux de calcaire.
- La deuxième définition de l'argile est minéralogique : elle classe les particules selon leur nature. Les argiles sont ainsi définies par les minéralogistes comme des phyllosilicates constitués de feuillets de silicates d'alumine de l'ordre du nanomètre. On parle également

de minéraux argileux. La composition de ces feuillets, leur épaisseur, leur structure définissent la famille argileuse et plus précisément le type d'argile.

La Figure I.1 illustre la structure et la formulation chimique des minéraux argileux les plus courants comme la kaolinite (argile de type 1:1), la montmorillonite, l'illite et muscovite (argiles de type 2:1).

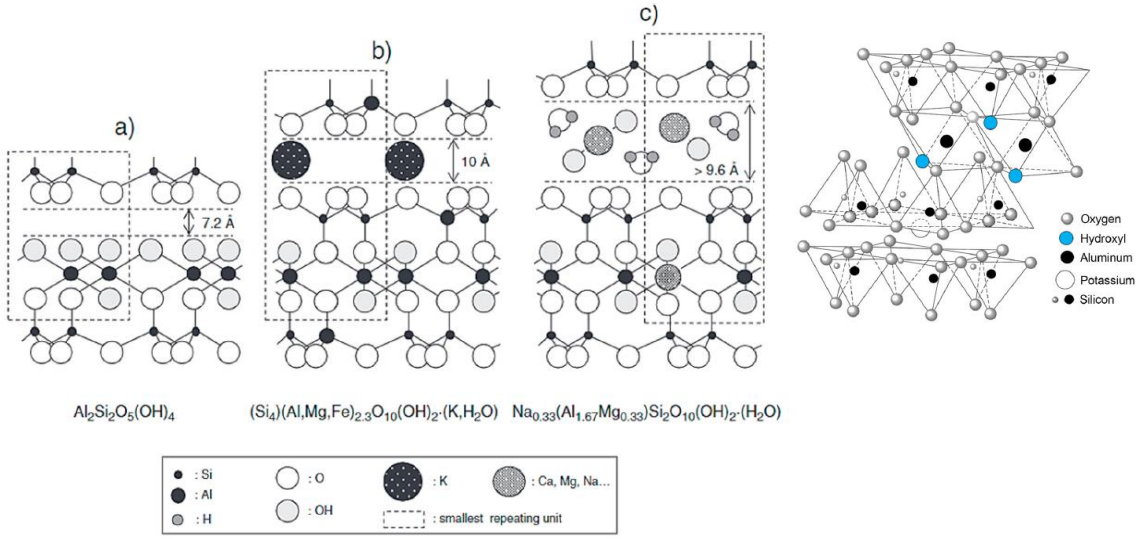


Figure I.1 : Formule chimique et structure de (a) la kaolinite, (b) l'illite et (c) la montmorillonite [Al-Noaimat et al., 2023] et (d) Muscovite [Lei et al., 2022]

La kaolinite a été utilisée dans la plupart des études en raison de sa réactivité pouzzolanique plus élevée que les autres minéraux argileux et de l'élimination plus facile des molécules d'eau dans les argiles kaolinitiques [Al-Noaimat et al., 2023].

I.2.2 Fillers calcaires

La poudre de calcite, de marbre ou de dolomie peuvent toutes considérées comme filler calcaire (FC). 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 [Dhandapani et al., 2021], le mécanisme d'influence des fillers calcaires sur les propriétés des matériaux cimentaires peut être largement classé sous les deux grands axes :

- Effets physiques, à savoir : l'action de dilution, l'action de cisaillement et la réduction

de l'espace capillaire.

- Effets chimiques, à savoir : la nucléation sur la surface de calcite, l'accélération de la réaction C3S et l'impact sur l'assemblage des phases.

I.2.3 Activités hydraulique et pouzzolanique

Un liant hydraulique est un liant qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau et il est aussi capable de le faire sous l'eau, ce que l'on nomme hydraulicité [Site web3 : wikipedia].

Par contre, selon la norme américaine ASTM C125-07, les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. [Site web Souchu, 2014]

I.2.4 Réaction pouzzolanique

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) (C_3A. SiO_2), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit :

$CaO+SiO_2+H_2O \rightarrow CSH$ (réaction pouzzolanique)……………………………..(1)

$3CaO.SiO_2+H_2O \rightarrow CSH+Ca(OH)_2$ (réaction d'hydratation du ciment Portland)…..(2)

On constate donc que la réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium, appelé aussi Portlandite ($Ca(OH)_2$), contrairement à l'hydratation du clinker qui en libère.

[Dron, 1978] a remarqué que l'écriture simplifiée de la réaction pouzzolanique pourrait faire penser que des formes à haute cristallinité, le quartz, par exemple, seraient susceptibles de réagir avec la chaux. Ce n'est pas le cas.

[Massazza, 1976] a montré que la réaction pouzzolanique ne se produit que lorsque la silice et l'alumine sont constitutives de phases vitreuses ou amorphes, à la seule exception des zéolites qui sont des minéraux cristallisés.

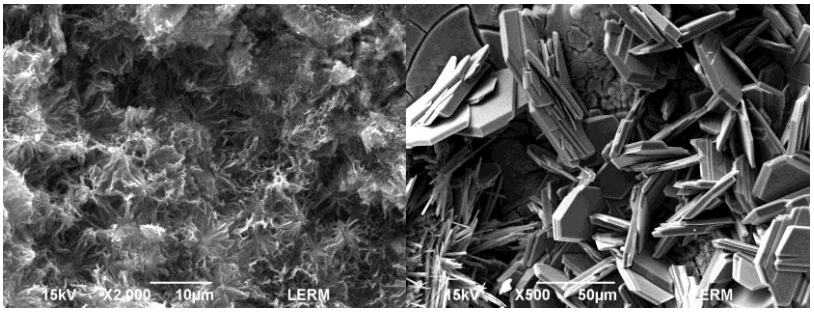


Figure I.2 a) Gel de C-S-H b) Portlandite (Extrait de [Philippe Souchu, 2014])

[Malquori, 1960] avait recueilli les résultats de nombreuses études menées sur les produits de la réaction pouzzolanique, et il a trouvé : [Site web Philippe Souchu, 2014]

- Silicate de calcium hydraté (CSH)
- Aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13})

Et, sous certaines conditions :

- Gehlenite hydratée (C_2ASH_8)
- Ettringite ($3CaO.AL_2O_3.3SO_4Ca, 32H_2O$)
- Monosulfo-aluminate ($3CaO.AL_2O_3.CaSO_4, 12H_2O$)

I.3 Historique de l'utilisation des ciments argile calcinée calcaire (LC3)

La littérature montre que l'utilisation des argiles calcinées comme ajout cimentaire a une longue histoire. Selon [Antoni, 2013], au début des années 1950, Mielenz et al, ont étudié la calcination de la pouzzolane et leur utilisation possible pour une application dans le béton aux États-Unis. Le premier rapport d'utilisation du métakaolin comme matériau cimentaire supplémentaire (SCM) pour la construction remonte aux années 1960 au Brésil, en remplacement de 30% de ciment en volume. En Inde, l'argile calcinée finement broyée a été utilisée, à la même époque, pour la construction du barrage de Bhakra. En effet, l'utilisation industrielle de l'argile calcinée en remplacement du ciment reste globalement marginale par rapport aux autres ajouts cimentaires comme les cendres volantes ou le laitier. Les argiles sont disponibles dans le monde entier. A titre d'exemple, les ressources totales de kaolin aux Etats-Unis sont estimées à plus d'un milliard de tonnes [Antoni, 2013].

I.4 Composition et chimie de LC3

Les ressources à venir qui ont suscité beaucoup d'intérêt sont les argiles calcinées. Leur disponibilité, leur réactivité pouzzolanique après calcination, en font un matériau efficace pour remplacer le clinker. Dans la même catégorie, la marne calcinée est un exemple, et du

fait de sa faible utilisation dans les applications conventionnelles, la marne est donc également considérée comme un déchet valorisable en grande quantité à moindre coût.
Les argiles calcinées sont certainement des matériaux clés à cet égard, il est prouvé qu'elles sont abondantes dans presque tous les coins du monde, et elles sont donc devenues la source la plus prometteuse de SCM qui peuvent contribuer de manière substantielle à réduire davantage l'impact environnemental du ciment et bien évident du béton.

Selon [Sharma et al, 2021], l'idée de LC3 est basée sur l'observation que les ciments contenant de l'alumine réagissent avec les phases carbonates pour produire des phases carboaluminates dures et cristallines, et contribuent au développement de la microstructure. Alors que les argiles calcinées sont bien établies en tant que matériaux pouzzolaniques et que le calcaire est également largement utilisé comme charge dans les ciments, l'idée de combiner les deux pour obtenir des niveaux de remplacement du clinker plus élevés a été signalée pour la première fois en 2012. La composition de LC3 par rapport au ciment Portland ordinaire (OPC) est illustrée à la Figure I.3. Une augmentation significative de la formation des phases carboaluminate a été signalée avec cette combinaison comme base pour une performance comparable au ciment Portland. La production d'un C-A-S-H de densité inférieure a également été suggérée comme étant la cause des performances comparables, bien que les résultats de la RMN aient montré que la teneur en eau du C-A-S-H dans LC3 est similaire à celle des autres ciments et qu'il n'y a pas telle différence de densité [Sharma et al, 2021].

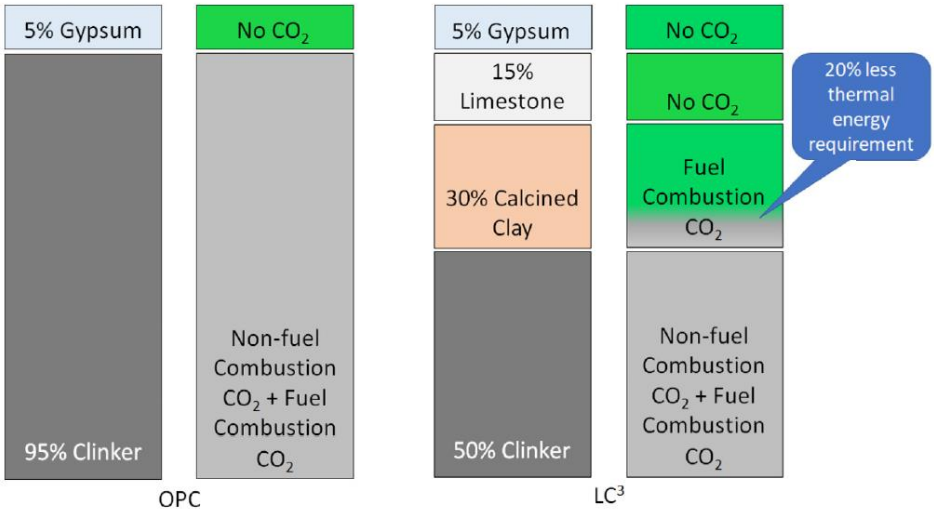


Figure I.3 : Comparaison de la composition de l'OPC et du LC3 [Sharma et al, 2021]

Dans les années à venir, les entreprises cimentières chercheront à atteindre le concept d'économies d'échelle, avec l'augmentation de la production et en diminuant les coûts tout en réduisant les émissions de CO_2. A la lumière de tout ça, plusieurs moyens ont été étudiés par

l'industrie du ciment afin d'atténuer les effets nocifs sur l'environnement. Le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable a proposé de nombreux scénarios d'atténuation [8] grâce à l'efficacité énergétique, aux carburants alternatifs, au captage et au stockage du carbone (CSC) et au substitut du clinker. Pendant ce temps, de nombreux défis sont relevés par les communautés industrielles pour mettre en œuvre efficacement ces stratégies dans les cimenteries et pour mesurer les avantages d'un point de vue environnemental et économique.

La figure I.4 présente les résultats obtenus lorsque la meilleure technologie disponible a été utilisée, selon [Berriel et al., 2016]. On peut constater que LC3 est nettement meilleur du point de vue impact environnemental produit et du point de vue coût par rapport au ciment Portland (OPC). Selon [Yu et al., 2021], l'argile calcinée est réapparue récemment comme une nouvelle source de SCM. De plus, l'argile calcinée étant un produit manufacturé, elle offre une bien meilleure opportunité de contrôle de la qualité. La recherche sur l'utilisation d'argile calcinée en conjonction avec de la poudre de calcaire s'est intensifiée ces dernières années pour développer un nouveau ciment composé vert connu sous le nom de ciment calcaire-argile calcinée (LC2), composé de 30 % d'argile calcinée, 15 % de calcaire, 50 % clinker et 5 % de gypse [Scrivener et al., 2018]. Un tel ciment peut réduire les émissions de carbone de la production de ciment jusqu'à 30 %, sur la base d'une estimation à Cuba et en Inde. Il a été constaté que le béton normal fabriqué avec le ciment LC2 susmentionné présentait des propriétés mécaniques très similaires à celles du ciment Portland. De plus, le ciment LC2 a également été utilisé dans des matériaux cimentaires renforcés de fibres d'alcool polyvinylique, de fibres de polyéthylène et de fibres de polypropylène, et satisfaisant les performances mécaniques ont été atteintes [Yu et al., 2021].

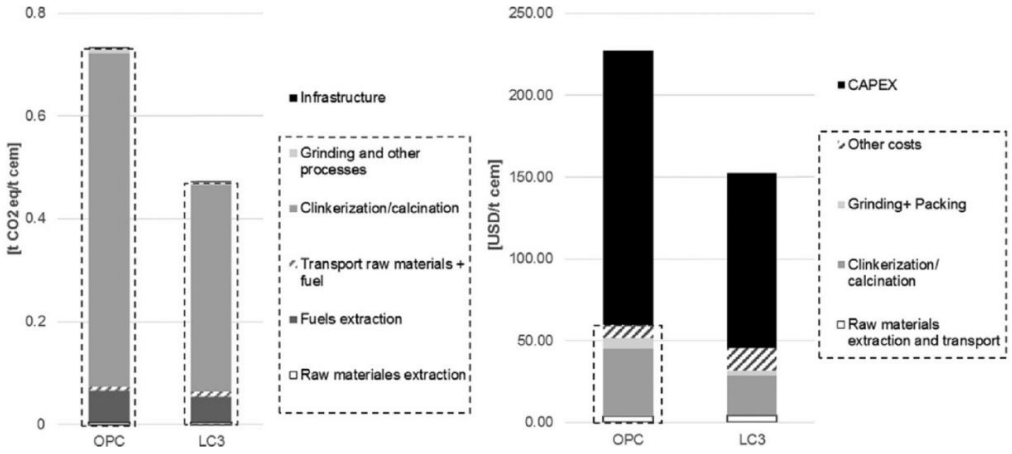


Figure I.4 : Comparaison entre (à gauche) les émissions de CO_2 et (à droite) le coût de production de l'OPC par rapport au LC3 [Berriel et al., 2016].

I.5 Norme

La norme européenne du ciment considère la marne calcinée comme une pouzzolane industrielle pouvant être utilisée dans la formulation du ciment. La norme NF EN 197-5 a pour but de spécifier les exigences relatives à deux nouveaux types de ciments (Figure I.5), non couverts par la norme NF EN 197-1 (2011), et destinés à la mise en œuvre de béton, mortier et coulis [Site web4] :

- Ciment Portland composé CEM II/C-M
- Ciment composé CEM VI

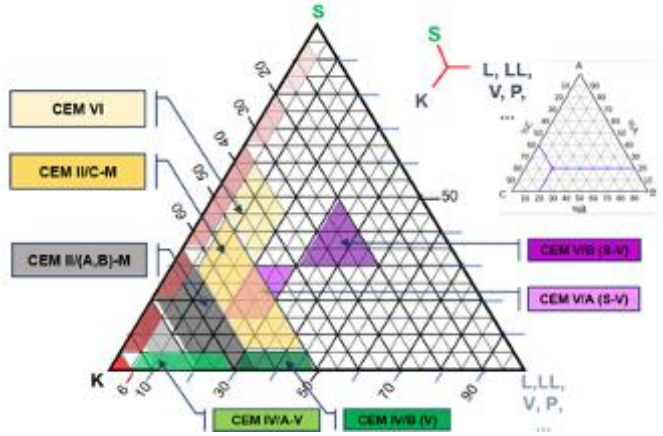


Figure I.5 : Diagramme triangulaire présente les domaines d'existence de nouveaux ciments selon la norme [NF EN 197-5].

Sans rentrer dans le détail, c'est en augmentant la part des matériaux cimentaires dans leurs compositions, et en diversifiant leurs sources, que ces ciments présentent une empreinte carbone réduite de 35 %, comparé à la moyenne des ciments actuellement dans le commerce.

Ces ciments « bas carbone » vont pouvoir être commercialisés, permettant aux acteurs de la construction de baisser leur empreinte CO_2, tout en continuant à respecter les exigences de durabilité et de performance de la norme EN 206/CN. La parution de la norme européenne ciment NF EN 197-5 (mai 2021) dans la collection AFNOR était prévue le 1er octobre 2021.

I.6 Activation thermique de l'argile

Selon Bahhou et al., [2021], une variété de voies thermiques, mécaniques et chimiques ou un mélange de celles-ci peuvent être utilisées pour obtenir un matériau réactif. Le traitement thermique nécessite un processus de chauffage à des températures comprises entre 500 et 900 °C, tandis que les méthodes mécaniques dépendent d'un broyage prolongé.

A l'état naturel, les minéraux argileux à structure cristalline ne possèdent pas de propriétés pouzzolaniques. Cependant, lorsqu'ils sont calcinés à des températures comprises entre 600 et 900 °C, ils présentent l'activité pouzzolanique requise [Trezza et al., 2018]. L'activation

thermique s'effectue considérablement sous les températures de formation du verre. L'effondrement des couches structurelles est caractérisé par l'élimination des groupes OH généralement connue sous le nom de dihydroxylation [Zhou et al., 2017]. Cette transformation rend le minéral argileux fortement recommandé comme SCM. Par exemple, le désordre structural de la kaolinite conduit à la formation d'un état métastable, appelé métakaolin, et plus la réactivité du métakaolin est élevée, plus la teneur en ions aluminium penta-coordonnés survenant lors de la dihydroxylation est élevée [Antoni et al., 2012]. Une température de calcination plus élevée est nécessaire pour atteindre une excellente réactivité avec les argiles qui ont un haut degré d'ordre, en général, la température d'activation se situe entre la réorganisation structurale et la recristallisation [Habert, et al., 2009]. Les argiles calcinées peuvent être plus ou moins réactives selon la minéralogie de l'argile, en fait, ce paramètre affecte principalement la température de calcination, c'est pourquoi cette température doit être choisie avec soin pour obtenir l'activité pouzzolanique la plus élevée [Taylor-Lange et al., 2015] .

Parmi les argiles naturelles, les argiles illites ont une température d'activation élevée, avec une certaine cristallinité restant même après déshydroxylation [Fernandez et al., 2011], pour la kaolinite ou la montmorillonite, l'écart entre la température de déshydroxylation ou de réorganisation structurale et la température de recristallisation est beaucoup plus important par rapport à l'illite lorsque les deux phénomènes se produisent presque à la même température. Il convient de mentionner que la recristallisation peut avoir lieu si cette température est dépassée et par conséquent, la réactivité diminue. Par conséquent, pour obtenir l'activité pouzzolanique, la température ne doit pas atteindre le point de frittage car à ce niveau particulier, les minéraux argileux peuvent partiellement fondre [Fernandez et al., 2011], la structure désordonnée doit également être fixée rapidement afin qu'il n'y ait ni temps ni énergie à réorganiser.

Lorsque la marne est calcinée à la bonne température, c'est une pouzzolane efficace fournissant une résistance adéquate pour les matériaux cimentaires. Les résultats ont révélé que la réactivité pouzzolanique des marnes a augmenté depuis la formation d'une phase vitreuse lors de la calcination des argiles contenant de fortes quantités de calcite. Cette phase amorphe conduit à un désordre structural, qui dépend principalement de la minéralogie argileuse [Danner et al., 2021].

Selon la figure 3, on peut conclure que la plupart des échantillons de marnes atteignent leur réactivité pouzzolanique la plus élevée à environ 800 °C. Il est à noter que la plupart des marnes étudiées dans la littérature contiennent de la montmorillonite ainsi que d'autres

minéraux tels que la kaolinite ou l'illite. En plus, la répartition des points dans cette figure montre aussi bien une grande corrélation entre les minéraux argileux contenus dans la marne et leur température optimale de calcination. Ils pointaient tous vers 800 °C comme température d'activation optimale. A cet effet, le choix de 800 °C se justifie par la formation d'une phase vitreuse à cette température tout en évitant la recristallisation de nouveaux minéraux Bahhou et al., [2021]. Certains minéraux de carbonate de calcium pourraient subsister après le traitement thermique [Danner et al., 2020], et réagiront ensuite avec les hydrates d'aluminate de calcium pour former des produits essentiels, à savoir des phases carboaluminates [De Weerdt et al., 2008].

Les résultats de la recherche [Danner et al., 2013] ont montré que l'activité pouzzolanique des marnes diminuait lorsque la température de frittage était supérieure à 900 °C. Ceci est lié à des cristallisations de phases inactives à savoir l'anorthite, le diopside et la gehlénite (qui sont des espèces minéraux du groupe des silicates). De plus, la quantité de périclase (qui est une espèce minérale de formule MgO avec des traces de fer) et de chaux libre (CaO) diminuait à mesure que la température de calcination augmentait, indiquant que le calcium et le magnésium contribuent à la formation de diverses phases à haute température [Bullerjahn et al., 2020].

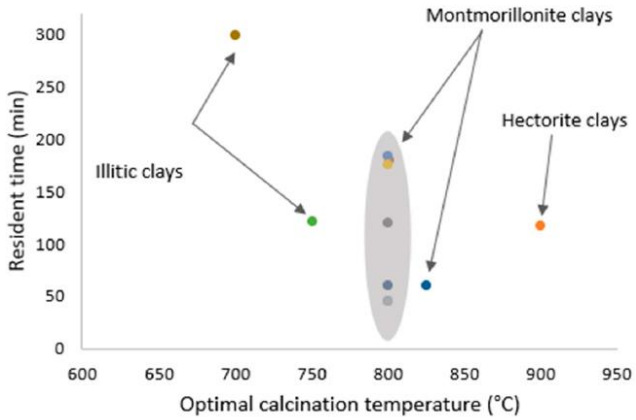


Figure I.6 : Temps de séjour en fonction de la température d'activation optimale pour la marne étudiée utilisée comme SCM (Extrait de [Bahhou et al., 2021])

I.7 Influence de l'argile calcinée sur l'ouvrabilité

Selon [Ferreiro et al., 2017], les propriétés à l'état frais du béton, telle que l'ouvrabilité, peuvent être considérablement affectées par la teneur totale en SO_3 et la solubilité des phases contenant du sulfate, ce qui peut entraîner un durcissement précoce (flash ou fausse prise) respectivement en raison de trop peu ou trop de sulfate disponible tôt. De plus, les types et les dosages des adjuvants chimiques qui sont ajoutés pour obtenir l'écoulement initial souhaité

dans le béton autoplaçant (BAP) et l'affaissement dans les bétons conventionnels, doivent être compatibles avec la solubilité des phases sulfatées dans le ciment.

Yu et al., [2021] ont étudié l'effet de LC3 (30% d'argile calcinée, 15% du FC, 50% du clinker et 5% du gypse) sur le coefficient de déformabilité (rapport de la différence d'étalement et l'étalement du témoin) et ils ont fait une comparaison avec des mortiers à base des cendres volantes (FA). Ils ont trouvé que l'augmentation de la teneur en LC3 conduit à une perte d'ouvrabilité en diminuant le facteur de déformabilité, ce qui est similaire à la tendance observée par [Shah et al., 2020]. En effet, l'argile calcinée peut adsorber une plus grande quantité d'eau par rapport à celle du ciment et des cendres volantes compte tenu de la surface spécifique beaucoup plus élevée [Ferreiro et al., 2017]. En ce qui concerne les mélanges avec SCM de 25 %, 50 % et 80 % dans le liant, le coefficient de déformabilité pour la série LC2 est respectivement de 4,5 %, 13,4 % et 23,7 % inférieur à celui de la série FA (Figure I.7). En ce qui concerne l'effet de la forme des particules, la réduction du frottement des particules des FA par rapport LC2 est clair dans ce cas. En plus, l'argile calcinée a une finesse élevée, qui nécessite des teneurs plus élevées en Sps ou en eau pour obtenir une maniabilité pratique pour des applications réelles.

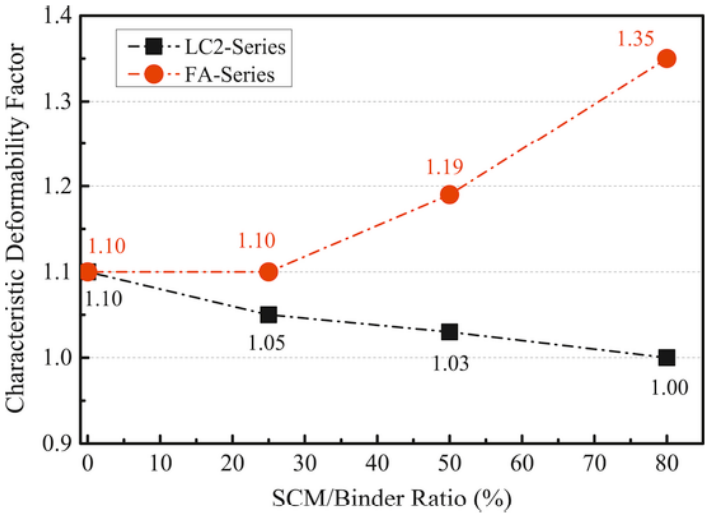


Figure I.7 : Facteur de déformabilité caractéristique des mortiers normalisés à base de LC2 et FA. (Extrait de [Yu et al., 2021])

I.8 Influence de superplastifiant sur l'ouvrabilité de LC3

Nair et al., [2020] ont étudié l'évaluation des caractéristiques rhéologiques des pâtes cimentaires préparées avec du LC3, en comparaison avec le ciment Portland ordinaire et le ciment Portland avec FA. L'impact sur le maintien d'ouvrabilité dans le béton a été également évalué. Un superplastifiant (Sp) à base d'éther polycarboxylique (PCE) et un autre de

naphtalène formaldéhyde sulfoné (SNF) conformes à la norme IS 9103–2004 ont été utilisés dans cette étude. Une comparaison des performances de différents Sp disponibles dans le commerce a été effectuée à l'aide d'essais de rétention d'écoulement de mortier, réalisés sur des mortiers à béton équivalent (MBE), et d'essais de rétention d'affaissement sur du béton. Les résultats mettent en évidence l'impact des argiles calcinées sur l'augmentation de la demande en Sp, et montrent également les difficultés à conserver l'ouvrabilité sur des durées prolongées.

Dans cette étude, [Nair et al., 2020], on observe que la viscosité diminue avec l'augmentation du rapport E/C (Figure I.8). Pour le rapport E/C de 0,35, l'OPC et le FA30 ont montré un comportement de rhéofluidifiant, tandis que la pâte LC3 a montré un schéma différent avec une viscosité presque constante à des taux de cisaillement croissants. Cette tendance se reflète à la fois dans les pâtes à base de PCE et SNF, et pourrait être attribuée à la nature hautement cohésive de LC3, résultant de sa grande finesse. La viscosité du FA30 est faible par rapport à l'OPC et au LC3 pour un rapport E/C de 0,35 au dosage de saturation. Lorsque le rapport E/C a augmenté de 0,35 à 0,40, le comportement d'écoulement de LC3 était rhéofluidifiant, similaire à OPC et FA30. Il convient de noter que pour les systèmes LC3, il y a eu un changement significatif dans le comportement de l'écoulement lorsque le rapport E/C a été augmenté de 0,35 à 0,40 (Figures I.8 et I.9). Alors que la viscosité était significativement plus élevée que l'OPC au rapport E/C inférieur, il y avait une réduction considérable en dessous de l'OPC pour le rapport E/C supérieur pour les systèmes LC3 avec PCE. Cependant, la viscosité des mélanges LC3 avec SNF est restée bien supérieure à celle des systèmes OPC et FA30.

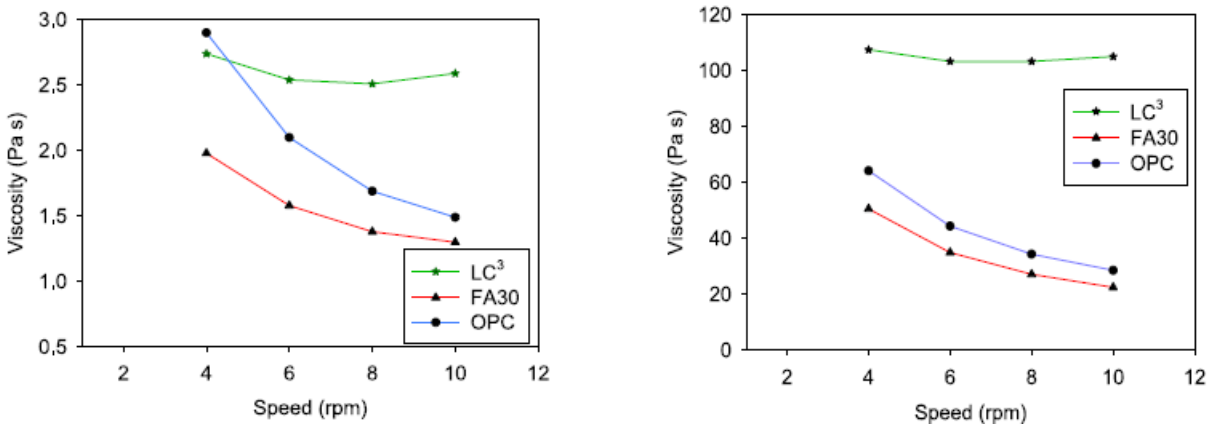


Figure I.8 : Evolution de la viscosité des pâtes à la dose de saturation en a) PCE et SNF avec E/C=0,35. (Extrait de [Nair et al., 2020])

En revanche, la corrélation entre le dosage de saturation en Sp de la pâte et le dosage requis pour atteindre l'affaissement ciblé du béton est illustrée à la Figure I.10. Comme le montre la Figure I.10, alors que le dosage de saturation du Sp PCE dans la pâte augmente régulièrement

avec une diminution du rapport E/C, le dosage correspondant pour produire un affaissement élevé de 180 à 200 mm dans le béton ne change pas de manière significative jusqu'à ce qu'un E/C inférieur à 0,40. En dessous de ce rapport, il y a une augmentation importante du dosage PCE nécessaire pour atteindre l'affaissement ciblé [Nair et al., 2020].

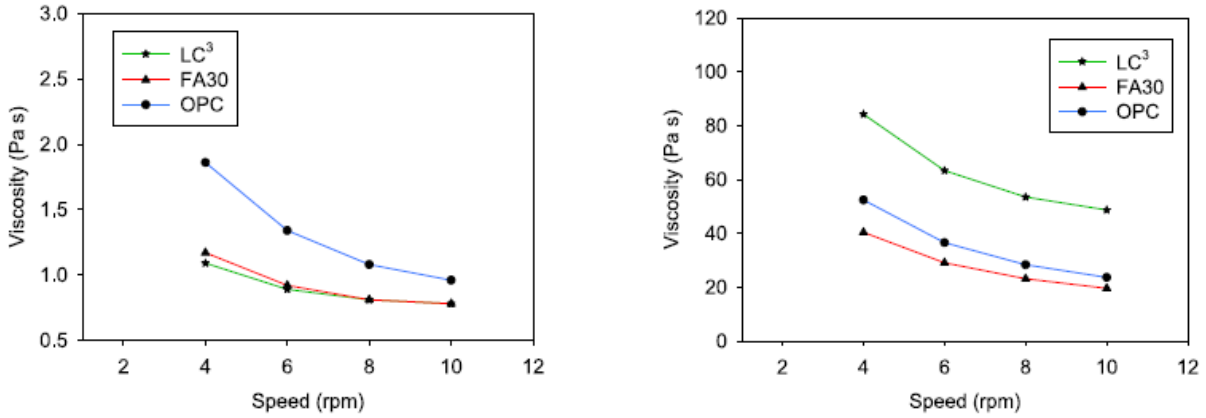


Figure I.9 : Evolution de la viscosité des pâtes à la dose de saturation en a) PCE et SNF avec E/C=0,40. (Extrait de [Nair et al., 2020])

Par ailleurs, afin de comprendre l'influence de la réduction de la teneur en eau par rapport au dosage du Sp, la variation de la teneur en eau et le besoin du béton en Sp a été tracée comme indiqué à la Figure I.11. On constate que pour une réduction de la teneur en eau de 180 kg/m^3 à 167 kg/m^3, il n'y a pas eu de modification significative au dosage en SP nécessaire pour atteindre l'ouvrabilité visée. Cependant, en dessous de 167 kg/m^3, le dosage en SP nécessaire augmente significativement avec la diminution de la teneur en eau [Nair et al., 2020].

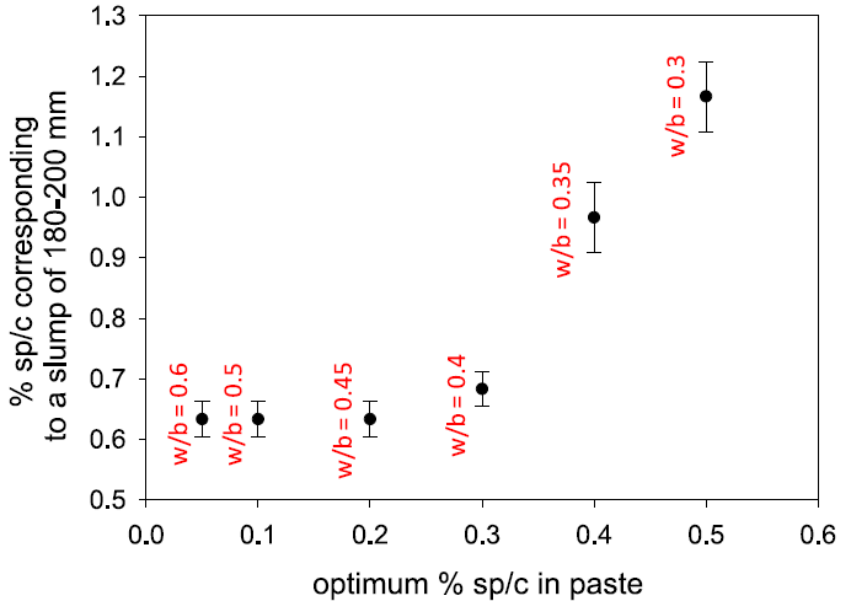


Figure I.10 : Corrélation entre le dosage de saturation en PCE des pâtes et le dosage en PCE de bétons correspondants ayant un affaissement de 19±1cm. (Extrait de [Nair et al., 2020])

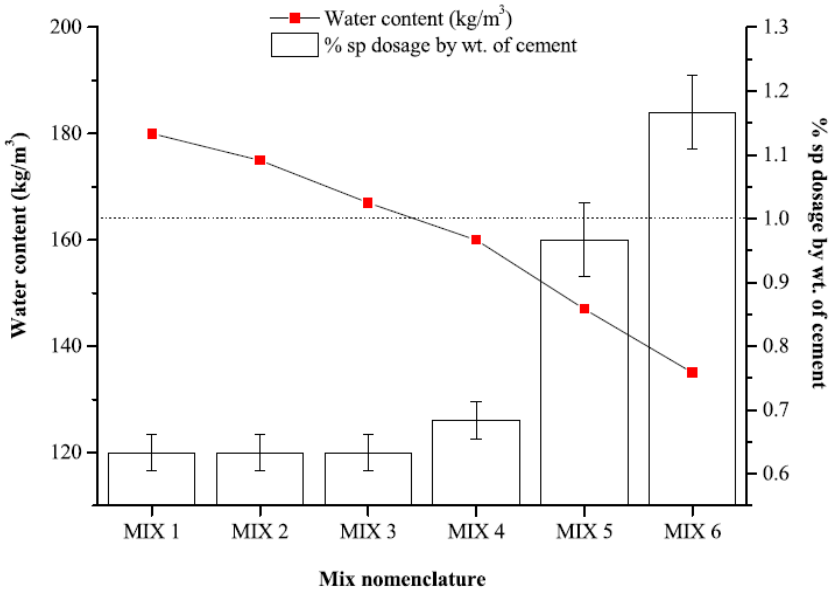


Figure I.11 : Teneur en eau et dosage en Sp PCE requis pour les bétons étudiés. (Extrait de [Nair et al., 2020])

I.9 Influence de l'argile calcinée sur la résistance mécanique

La mesure de la résistance mécanique à la compression et à la traction est considérée comme l'un des moyens les plus utiles pour évaluer l'efficacité d'un liant et son adaptation dans la pratique. Si le LC3 étudié peut améliorer les performances mécaniques et la durabilité du béton à long terme, ceci donne un intérêt majeur dans son application dans la production du béton. Jusqu'à 55 % de remplacement du clinker, ce matériau peut assurer la réaction pouzzolanique nécessaire pour avoir la résistance requise sur 28 jours. Au-delà, jusqu'à 50 % de substitution par de l'argile calcinée, la résistance à la compression à 28 jours est similaire à celle du mortier de référence [Bahhou et al., 2021].

[Yu et al., 2021] ont trouvé que LC2 ait une efficacité cimentaire plus élevée et puisse développer une résistance initiale plus élevée que les FA siliceuses. Plus précisément, les ciments mélangés avec 50 %, 60 % et 70 % de LC2 ont atteint une résistance à la compression de 34,2 MPa, 28,2 MPa et 21,7 MPa à 3 jours, respectivement (Figure I.12). En revanche, sous le même niveau de remplacement, le LC3 donne une énergie intrinsèque et des émissions de carbone par unité de résistance à la compression inférieures à celles de la série FA à l'âge de 28 jours, mais supérieures à la série FA à l'âge de 360 jours. Comme il est représenté sur la Figure I.13, les ciments mélangés avec 50 % à 60 % de LC2 avaient un coût de matériau inférieur pour la résistance à la compression unitaire que le ciment ordinaire et le ciment mélangé avec des FA [Yu et al., 2021].

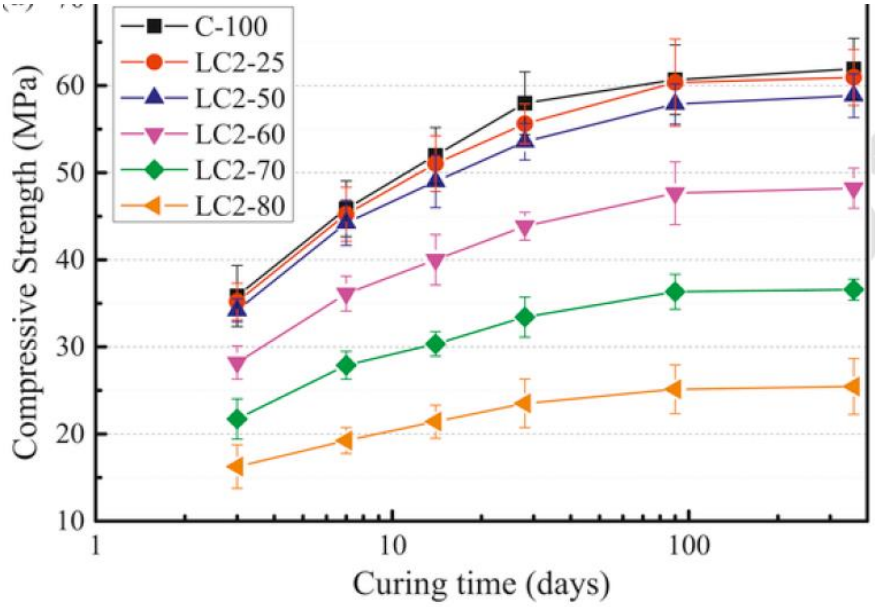


Figure I.12 : Evolution de la résistance à la compression du mortier aux différents âges. (Extrait de [Yu et al., 2021])

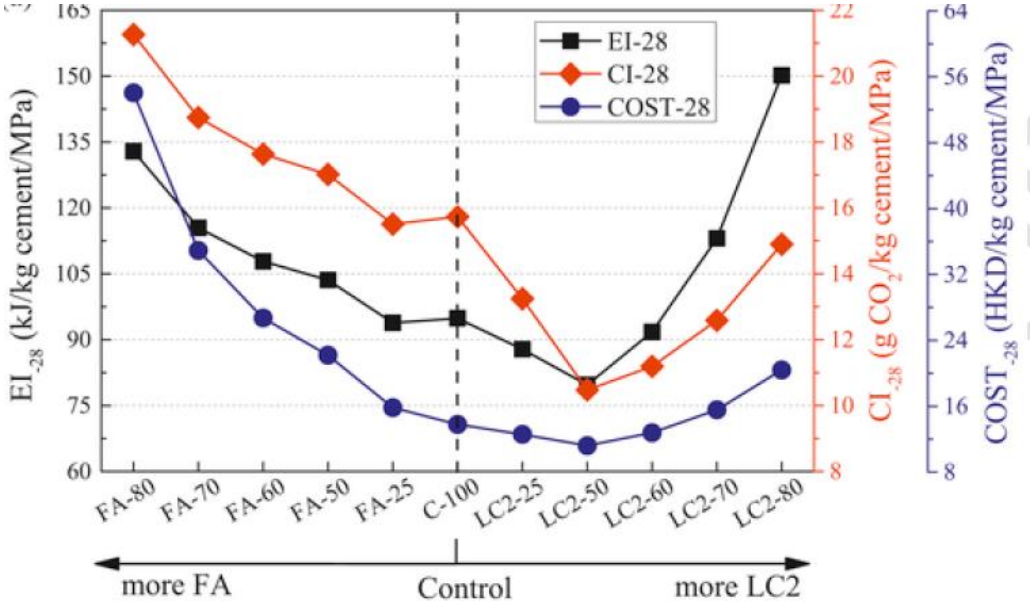


Figure I.13 : Comparaison de l'indice d'énergie grise (EI), de l'indice d'émission de carbone (CI) et de l'indice du coût des matériaux (COST) par unité de résistance à la compression dans les ciments mélangés à 28 jours. (Extrait de [Yu et al., 2021])

Récemment, [Mehsas et al,. 2021] ont étudié deux types de kaolin algérien (KT1 et KT2). Ils ont conclu que les kaolins KT1 et KT2 méritent d'être évalués comme SCM. L'élaboration de métakaolin (MK) hautement réactif est possible en chauffant ces matériaux à 800 °C pendant 5 h. Le MK dérivé de KT2 est légèrement plus efficace que celui obtenu à partir de KT1, en raison de sa forte teneur en kaolinite (Figure I.14).

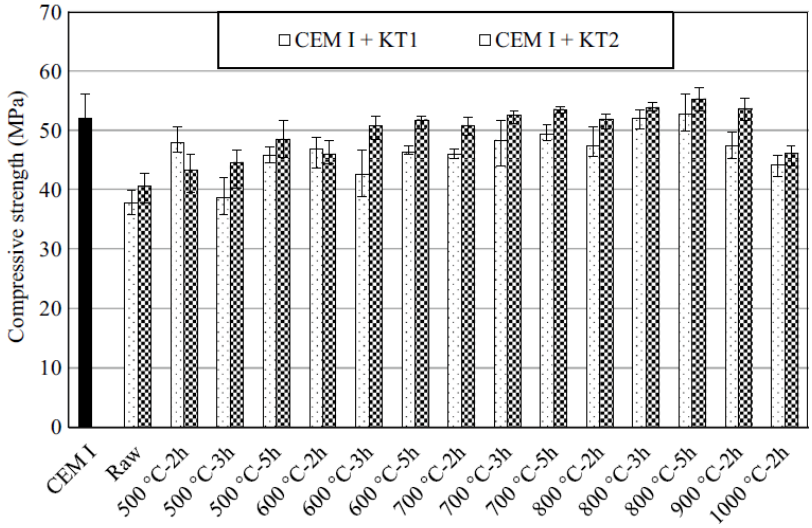


Figure I.14 : Résistance à la compression à 28 jours des mélanges de mortier contenant 15 % en poids de kaolin brut et calciné [Mehsas et al,. 2021]

En 2016, Siline et al., ont étudié la marne algérienne de la ville de M'Sila. L'objectif de cette étude est d'optimiser la réactivité pouzzolanique des gisements argileux algériens composés essentiellement de calcite, de dolomite et d'illite/muscovite. Les cycles de traitement thermique ont été appliqués à ces gisements de matières premières en faisant varier la température et le temps de calcination. Les résultats montrent que la réactivité optimale a été obtenue à une température de calcination de 700 °C pendant 5 h (Figure I.15).

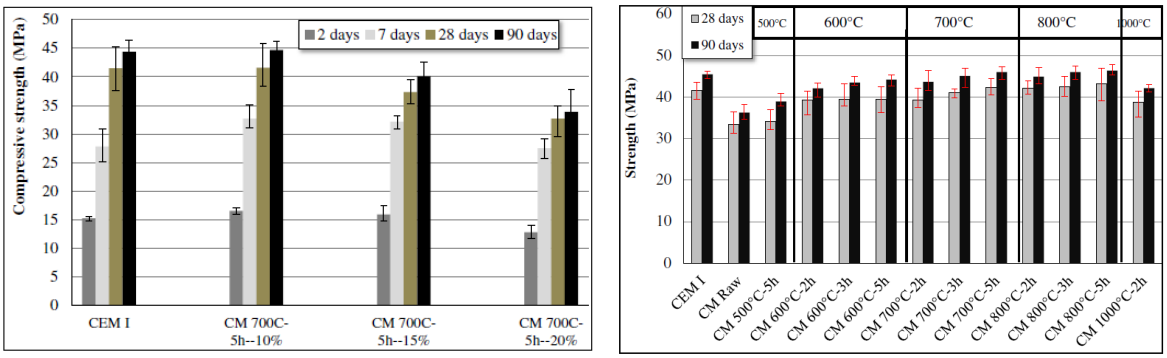


Figure I.15 : Résistance à la compression des mortiers à différents âges et différentes températures de calcination de LC3. [Siline et al., 2016]

De plus, l'ajout de 10 % du dépôt d'argile traité thermiquement à 85 % de clinker et à 5 % de gypse en poids conduit à la fabrication de mélanges ciments ayant les caractéristiques mécaniques les plus élevées. Il semble que l'ajout d'argile traitée thermiquement au clinker améliore les résistances des mortiers normalisés au jeune âge par rapport à ceux élaborés avec le CEM I. Cependant, des effets opposés ont été observés pour des âges allant jusqu'à 28 jours sauf pour les ciments mélangés avec de l'argile traitée à 700 °C- 5h. Le mélange optimal est élaboré avec une argile calcinée à 700 °C pendant 5 h. Les bétons fabriqués avec ce dernier

présentent des résistances à la compression assez similaires à celles du témoin [Siline et al., 2016].

[Avet et Scrivener, 2018] ont effectué des essais de résistance à la compression sur des mortiers selon la norme [EN 196-1] pour démontrer la faisabilité de l'utilisation de LC3-50 et pour évaluer l'influence de la teneur en kaolinite calcinée sur le développement de la résistance. Ces résultats présentés dans la Figure I.16 sont mis à jour à partir de [Avet et al., 2016] avec maintenant 46 argiles testées dans ce test de référence. La résistance du OPC est indiquée par des lignes pointillées. Une résistance similaire au OPC est obtenue pour des mélanges contenant du métakaolin assez pur à 3 jours déjà. A partir de 7 jours, l'utilisation d'argiles calcinées avec environ 40% de kaolinite calcinée permet d'obtenir une résistance similaire au PC. Pour les mélanges LC3-50 avec une kaolinite calcinée supérieure à 65%, la résistance continue d'augmenter après 3 jours d'hydratation malgré le ralentissement de l'hydratation du clinker. Cette augmentation s'explique par la réaction continue du métakaolin dans l'argile calcinée, conduisant à la formation plus élevée de C-A-S-H. Jusqu'à 7 jours d'hydratation, la résistance est linéairement corrélée à la teneur en kaolinite calcinée. Ce paramètre domine le développement de la résistance. Après 7 jours, le gain de résistance pour les mélanges LC3-50 avec de l'argile calcinée contenant plus d'environ 45 % de kaolinite calcinée devient moins significatif [Avet et Scrivener, 2018].

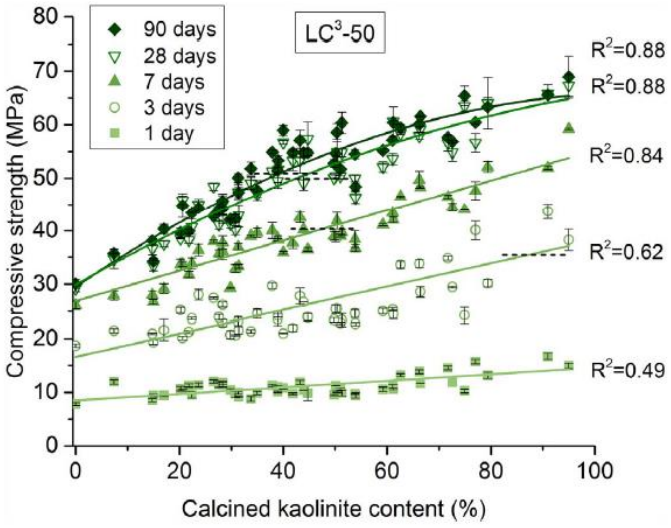


Figure I.16 : Résistance à la compression de LC3-50 en fonction de la teneur en kaolinite calcinée. Les lignes pointillées indiquent les points forts du OPC. [Avet et Scrivener, 2018]

La figure I.17 montre les valeurs de résistance à la compression des échantillons de mortier de ciment mesurées à différents âges, trouvées par [Shah et al., 2020]. Une augmentation de la résistance à la compression est observée jusqu'à 30% de remplacement du ciment avec LC2,

(avec un rapport 2 : 1 de l'argile calcinée et du calcaire, c.-à-d. 10% argile calcinée et 5% du FC), alors qu'à 50% de remplacement une résistance à la compression légèrement inférieure à l'OPC est observée. La résistance à la compression à 28 jours la plus élevée est observée pour le mélange contenant 15 % de LCCP. La figure 8 montre la résistance à la compression des échantillons de béton. Une résistance à la compression supérieure ou similaire à l'OPC est observée pour tous les niveaux de remplacement du ciment. [Shah et al., 2020]

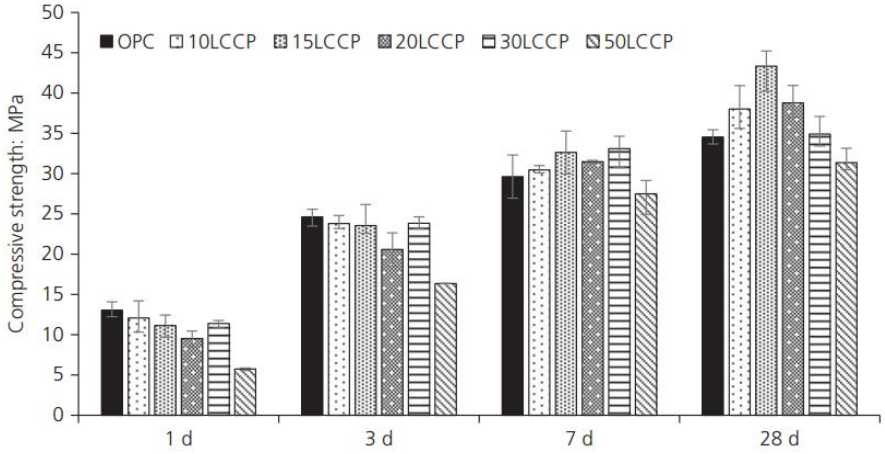


Figure I.17 : Résistance à la compression de mortier à différents âges pour différents niveaux de remplacement du ciment par LC2 (Extrait de [Shah et al., 2020])

Puisque la résistance à la compression est le paramètre clé pour toute conception structurale, un grand volume de travail sur l'influence de divers paramètres est disponible dans la littérature. Bien que la plupart des résultats montrent que la résistance à la compression à 28 jours du LC3 est similaire à celle d'un OPC produit à l'aide d'un clinker similaire, il existe une certaine variation dans les résultats à d'autres âges. La plupart des résultats montrent que la résistance à 3 jours du LC3 et de ses bétons est inférieure à celle de l'OPC et elle est supérieure à celle des ciments mélangés au laitier ou aux FA, selon [Sharma et al,. 2021]. Au bout de 7 jours, la force de LC3 a été signalée comme étant similaire ou supérieure à celle de l'OPC. Certaines études ont rapporté une augmentation minime de la résistance à la compression après 28 jours, tandis que d'autres ont rapporté une augmentation. Les premiers résultats montrent que des paramètres tels que la taille des particules des composants individuels et la composition du clinker, la température et la teneur en alcali jouent un rôle important sur le développement de la résistance [Sharma et al,. 2021].

Il a été rapporté que si la présence de grains de clinker plus fins améliore la résistance, il y a peu d'influence de la finesse des particules d'argile et de calcaire au-delà d'un certain niveau. Il a été montré que cela est principalement dû au fait que la disponibilité de la portlandite est le facteur limitant de l'hydratation de l'argile et du calcaire calcinés. C'est particulièrement le

cas lorsque des clinkers à faible teneur en alite sont utilisés. Une hydratation plus rapide des particules de clinker plus fines garantit que la demande en ions calcium par les deux autres composants est satisfaite. La consommation rapide d'ions calcium dans les réactions d'hydratation secondaires augmente le taux précoce d'hydratation du clinker, réduisant la disponibilité des phases de clinker non hydratées et le développement de la résistance aux âges ultérieurs. La raison de l'augmentation continue de la résistance après 28 jours, malgré l'absence de toute preuve d'hydratation supplémentaire, nécessite une enquête plus approfondie [Sharma et al,. 2021].

Selon les mêmes auteurs, la composition chimique du calcaire semble avoir une influence limitée sur le développement de la résistance. Lorsque le calcaire est remplacé par de la dolomite, le développement de la résistance est considéré comme légèrement plus lent, bien que la résistance à 28 jours soit similaire à celle obtenue lorsqu'une calcite pure est utilisée.

Les composites cimentaires techniques à base de LC3 ayant une teneur en clinker aussi faible que 20% peut atteindre une résistance à la traction d'environ 5 MPa qui diminue avec l'augmentation du rapport E/C. Il a été démontré que LC3 a une résistance à la flexion plus élevée que l'OPC en raison de la fraction plus élevée d'aluminates cristallins et de gel C-A-S-H dans LC3 [Sharma et al,. 2021].

I.10 Avantages environnementaux de l'utilisation de l’argile calcinée comme SCM

Selon Bahhou et al., [2021], pour répondre à la demande de ciment sans trop affecter l'environnement, les défis sont assez importants puisque l'émission de CO_2 provient de plusieurs étapes du processus de production : la décomposition du carbonate de calcium et la combustion des combustibles. Malgré les complexités mentionnées jusqu'à présent, l'utilisation de marne calcinée comme SCM est un réel avantage car les émissions globales de CO_2 seront réduites. La température de calcination passera de la température de clinkérisation classique (1450 °C) à une température d'environ 800 °C pour la calcination de la marne. De plus, la calcination des marnes ne dégage pas une grande partie de CO_2 car la calcite ne se décompose pas totalement.

D'un autre point de vue, les argiles sont considérées comme une ressource alternative efficace pour une production de ciment écologique et rentable. Ils sont facilement accessibles grâce à des projets d'infrastructures régionaux et n'ont pas les problèmes d'approvisionnement associés qui réduiront la charge sur la consommation de ressources naturelles et prolongeront la durée de vie d'une carrière. Malgré cela, l'utilisation de l’argile calcinée comme SCM peut générer d'importantes économies d'énergie et d'émissions de carbone [Bahhou et al., 2021].

I.11 Conclusion

La recherche bibliographique qui a été faite confirme que l'argile calcinée et même la marne calcinée peuvent être utilisées comme SCM, afin de produire un ciment à faible impact environnemental. Ceci est lié à la présence importante d'atomes réactifs créés lors de la déshydroxylation et la décarboxylation. Parmi les MCS, les argiles calcinées sont une voie prometteuse pour augmenter les taux de substitution du clinker.

En revanche, des études sur la calcination ont rapporté que la meilleure température pour les argiles en général et pour la marne en particulier est autour de 800 ± 50 °C et peut être optimisée pour chaque gisement d'argile à part. Cependant, une durée de 5 heures présente la durée de calcination optimale, sous réserve de la confirmer pour chaque type d'argile.

Par ailleurs, la composition optimale se trouve lorsque l'argile calcinée est combinée avec le filler calcaire avec un rapport 2 : 1. Par contre, la composition idéale du LC3 est la suivante : 30% d'argile calcinée + 15% du filler calcaire + 50% du clinker + 5% du gypse.

En effet, l'utilisation de ces argiles peu coûteuses est très prometteuse et devrait être étudiée plus en détail. Il faut plus de travail pour envisager un niveau de substitution plus élevé. Dans l'ensemble, la revue de la littérature montre qu'il reste beaucoup de travail sur les mélanges ternaires d'argile calcinée et du calcaire.

CHAPITRE II

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse d'abord à la présentation des matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail, à savoir : le ciment, le sable roulé, le sable de concassage, les fillers calcaires et l'argile calcinée, tout en montrant leur utilité ainsi que leurs caractéristiques et propriétés.

Ensuite, on présente les méthodes expérimentales adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre travail de recherche effectués à l'état frais et à l'état durci sur le mortier de ciment, à savoir **:**

- **Etat frais**

  -Essai de consistance

  -Essai de début et fin de prise

  -Mesure du temps d'écoulement à travers le maniabilimètre

  -Mesure de l'affaissement au mini-cône

- **Etat durci**

  -Essai de traction par flexion

  -Essai de compression

II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

Pour la confection du mortier, nous avons utilisé des matériaux locaux de la wilaya de Médéa, qui sont caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil selon les recommandations des normes en vigueur.

II.2.1 Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland de classe I (CEM I 42.5R), avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3241,30 cm^2/g (Figure II.1). Les caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques et mécaniques de ce ciment sont présentées dans le Tableau II.1



Figure II.1 : Ciment utilisé : CEM I42.5R

Tableau II.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment

Analyse chimique (%)	**Valeur**
Perte au feu	26 – 37
Teneur en sulfates (SO_3)	2,2 – 2,8
Teneur en oxyde de magnésium (MgO)	1,7 – 2,8
Teneur en chlorures (Cl^-)	0,03 – 0,07
Composition Potentielle du clinker (%)	
C_3S	56 – 66
C_2S	5,1 – 7,2
Propriétés physiques et mécaniques	
Consistance normale (%)	25,8-26,4 (27,2*)
Expansion à chaud (mm)	0,25 – 1,0
Résistance à la compression à 2 jours (MPa)	20 – 29
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	42,5 – 52,5
Temps de début de prise (Expérimentale)	150-190 (163*)
Temps de fin de prise (Expérimentale)	220-250 (211*)
(*) : Valeur expérimentale	

II.2.2 Granulats

II.2.2.1 Sable roulé

Nous avons utilisé un sable siliceux roulé, provient d'Oued-Souf (Figure II.2) et ses caractéristiques sont représentées dans le Tableau II.2 et sa courbe granulométrique est illustrée sur la Figure II.4.



Figure II.2 : Sable siliceux d'Oued-Souf

Tableau II.2 : Propriétés physiques d'identification de sable siliceux d'Oued-Souf

Caractéristiques	**Sable**
Provenance	Oued-Souf
Classe granulaire	0/3
Module de finesse	2.07
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2630
Masse volumique apparent (kg/m^3)	1487
Equivalent de sable (%)	81.16
Taux d'absorption d'eau (%)	1,2

Selon la courbe granulométrique de ce sable roulé (Figure II.4), nous remarquons qu'il présente une granulométrie continue. De plus, son module de finesse, qui vaut 2,07, est considéré comme un sable fin.

II.2.2.2 Sable concassé

A titre comparatif, nous avons utilisé aussi un sable de concassage calcaire (Figure II.3), provient du gisement de Hannacha, Wilaya de Médéa, ses caractéristiques sont représentées dans les Tableaux II.3 et II.4. Les courbes granulométriques du sable concassé lavé et avec 5% de fines (>0.080 mm) sont présentées dans la Figure II.4. Nous remarquons que les sables utilisés sont caractérisés par des granulométries continues. Cependant, le sable utilisé possède un module de finesse égale à 3.2 (considéré comme un sable grossier).

Tableau II.3 : Analyses chimique du sable utilisé

Constituant (%)	SiO2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	P.F
Sable concassé	2,50	2,63	0,53	70,69	-	Traces	24,77

Tableau II.4 : Analyses physique du sable utilisé

Analyses physique	**Valeur**
Masse volumique absolue (t/m^3)	2,6
Masse volumique apparent (t/m^3)	1,65
Forme	Irrégulière
Module de finesse	3,64
Taux d'absorption d'eau du SC5 (%)	4,65



Figure II.3 : Sable concassé lavé

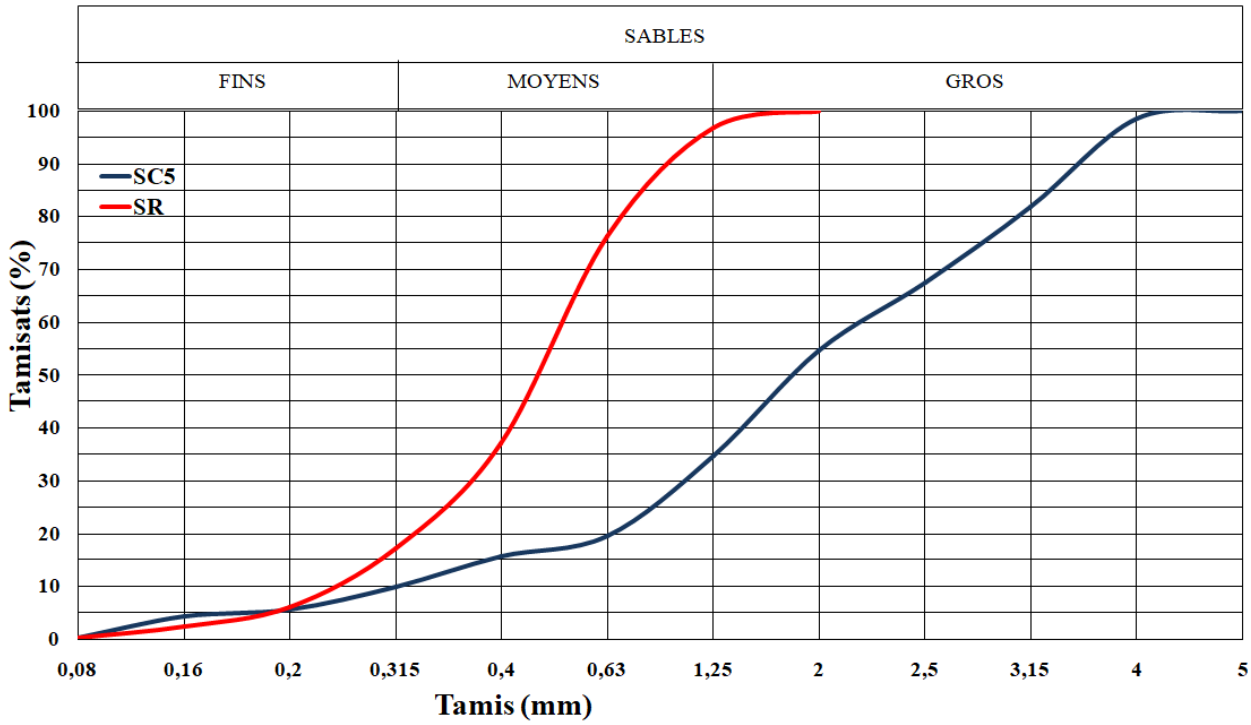


Figure II.4 : Courbes granulométriques du sable roulé (SR) et du sable concassé (SC5)

II.2.3 Fillers calcaires

On a utilisé deux types de filler calcaire (FC) dans notre étude (FCG : FC gris et FCB : FC blanc) utilisés dans notre étude proviennent du sable de concassage utilisé, dont on a parlé au paragraphe II.2.2. A titre comparatif, on a utilisé un autre type de FC de couleur blanche (FCB). Ils sont préparés comme il est représenté schématiquement sur la Figure II.6 et selon le protocole suivant :

D'abord, on commence par laver le sable concassé brut, pour éliminer toute présence des impuretés comme les fines argileuse potentiellement trouvées dans le sable brut. Ensuite, on le met dans l'étuve pendant une durée de 24 heures. Le sable séché va être broyé par la suite dans un vibro-broyeur à disque (Retsch RS200) à une vitesse de 1000 rpm pendant 5 minutes. A la fin, on le tamise à travers le tamis $80\mu m$. Ces fillers sont d'origine calcaire et contiennent principalement de la calcite ($CaCO_3$) et leurs caractéristiques sont représentées dans le Tableau II.5.

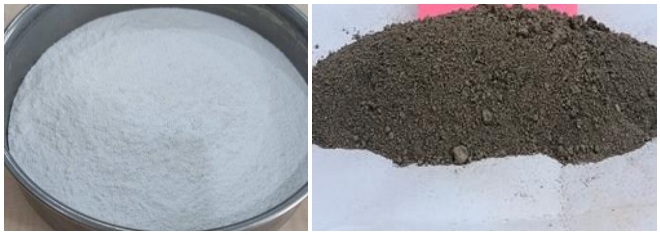


Figure II.5 : Fillers calcaires utilisés (FCG et FCB)

Tableau II.5 : Propriétés physiques du filler calcaire

Propriété physique	**Valeur**
La masse volumique absolue (kg/m^3)	2600
Surface spécifique (m^2/kg)	413,33



Figure II.6: Etapes de préparation du filler calcaire

II.2.4 Argile calcinée

Dans notre étude, on a utilisé deux types d'argile (A1 : Argile bleuâtre et A2 : Argile jaunâtre). L'argile calcinée a été obtenue en utilisant un four à moufle Nabertherm de laboratoire à température max 1100°C, modèle LV5/11/B180, à base d'un système spécial d'arrivée et d'évacuation de l'air fait en sorte que l'air soit renouvelé plus 6 fois par minute. Afin d'obtenir le produit final calciné, on a adopté le protocole expérimental suivant (Figure II.7) :

D'abord, on met l'argile dans l'étuve pour sèche le matériau à 100 °C. Ensuite, on broie l'argile manuellement à l'aide d'un mortier en bronze et son pilon. Après, on met cette matière première dans le four en utilisant des récipients en céramiques, sous des températures de calcination variant de 500°C à 800°C pendant des durées allant de 1 heure jusqu'à 5 heures, selon le type d'argile calcinée désirée. Finalement et bien évident après le refroidissement progressif de l'argile calcinée, on procède au broyage de ce matériau à une vitesse de 1000 rpm pendant 5min à l'aide d'un vibro-broyeur à disque (Retsch RS200). Enfin, on obtiendra le produit final par tamisage à 80µm. Les propriétés physiques obtenues de cette argile calcinée sont représentées dans le Tableau II.6.



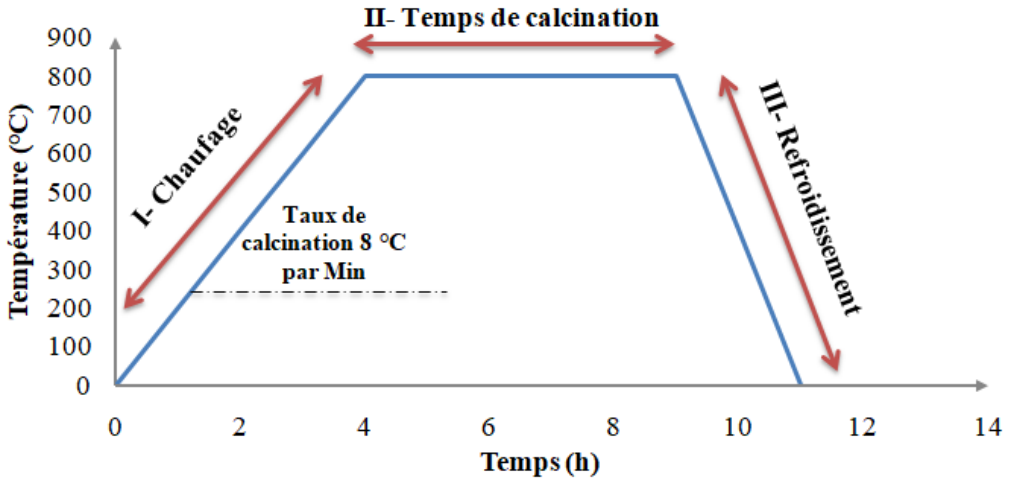


Figure II.7 : Etapes de préparation et le protocole expérimental de la calcination de l'argile

Tableau II.6 : Propriétés physiques d'argile calcinée

Propriétés physiques	Valeur
La masse volumique absolue (kg/m^3)	2500
Surface spécifique (m^2/kg)	499,19

II.2.5 Adjuvant superplastifiant

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés dans les bétons ou mortiers et même les pates de ciment lors du malaxage en faibles dosages par rapport au poids du ciment. Ils provoquent des modifications des propriétés ou du comportement des matériaux cimentaires permettant de donner une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaires à la fabrication des bétons. Deux types de superplastifiant ont été utilisés dans notre étude (Figure II.8). Le premier superplastifiant appelé TEMPO-10 et noté : Sp1. Il s'agit d'un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère acrylique, dont le Fabricant est SIKA. Cet adjuvant combine plusieurs mécanismes d'action. Par adsorption à la surface et le cloisonnement des fines pendant le processus d'hydratation, une rédaction d'eau extrêmement importante, une fluidité élevée et une évolution plus rapide des résistances à court terme seront atteintes. Le deuxième superplastifiant utilisé dans cette étude est le Glenium SKY 537, il est noté Sp2. Il s'agit d'un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'étherpolycaboxylique modifié, dont le fabricant est la compagnie chimique BASF. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises. Le GLENIUM® SKY 537 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 minutes avec un faible rapport eau sur ciment (E/C) et sans effet de retard de prise.



Figure II.8 : Adjuvants superplastifiants utilisés TEMPO-10 et GLENIUM-SKY 537

II.2.6 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 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 (EN196-1), 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.9).

- 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.

- 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 II.7.

Tableau II.7 : 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 operations			30s	30s	30s	15s	1 min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide



Figure II.9 : Malaxeur utilisé

II.4. Description des mélanges et désignation

II.4.1 Le mortier

Dans cette partie, nous avons réalisé neuf différentes séries de mortiers à base d'argile calcinée (AC) et de filler calcaire (FC) sans et avec adjuvant superplastifiant (Sp), bien évident avec un mortier témoin confectionné à titre comparatif avec seulement un ciment Portland CEMI (Figure II.10 et Tableau II.8). Il est à noter que la substitution se fait en terme massique pour tous les mélanges. Cependant, chaque série contient entre 3 et 5 mortiers, selon le protocole expérimental suivant :

- Série I : Substitution massique du ciment par 30% d'AC à 800°C et 15% du FC en utilisant deux types d'argile et deux types du FC.
- Série II : Substitution du ciment par 15% du FC et 30% d'AC à 500, 600 et 800°C, pendant 1, 3 et 5 heures.

- Série III : Substitution massique du ciment seulement par l'AC de 0 à 30% avec un pas de 10%.
- Série IV : Substitution massique du ciment par seulement le FC de 0 à 15%, avec un pas de 5%.
- Série V : Substitution massique du ciment par l'AC de 0 à 30% avec un pas de 10% et un taux fixe du FC vaut 5%.
- Série VI : Substitution massique du ciment par l'AC de 0 à 30% avec un pas de 10% et un taux fixe du FC vaut 10%.
- Série VII : Substitution massique du ciment par l'AC de 0 à 30% avec un pas de 10% et un taux fixe du FC vaut 15%.
- Série VIII : Substitution massique de l'AC de 0 à 30%, pas de 10%, en utilisant un sable concassé avec une teneur en filler calcaire égale à 5%.
- Série IX : Substitution massique du ciment avec 30% d'AC et 15% du FC en utilisant deux types de Sp dont le dosage est 0.8 et 1.8 respectivement pour le Sp1 et le Sp2.



Figure II.10 : Mélanges utilisés

Tableau II.8 : Compositions des mortiers confectionnés

	Nom	Ciment(g)	AC(%)	FC (%)	Sable(g)	Eau (g)	Sp(%)
Série I	MAC0FC0	700	0%	0%	2100	350	0
	MA1C30FCB15	385	30%	15%			
	MA1C30FCG15						
	MA2C30FCB15						
	MA2C30FCG15						
Série II	LC3-500-5H	385	30%	15%	2100	350	0
	LC3-600-5H						
	LC3-700-5H						
	LC3-700-3H						
	LC3-700-1H						
	LC3-800-3H						
	LC3-800-1H						
Série III	MAC10FC0	630	10%	0%	2100	350	0
	MAC20FC0	560	20%				
	MAC30FC0	490	30%				
Série IV	MAC0FC5	665	0%	5%	2100	350	0
	MAC0FC10	630		10%			
	MAC0FC15	595		15%			
Série V	MAC10FC5	595	10%	5%	2100	350	0
	MAC20FC5	525	20%				
	MAC30FC5	455	30%				
Série VI	MAC10FC10	560	10%	10%	2100	350	0
	MAC20FC10	490	20%				
	MAC30FC10	420	30%				
Série VII	MAC10FC15	525	10%	15%	2100	350	0
	MAC20FC15	455	20%				
Série VIII	MAC0SC5	700	0%	15%	1995	414	0
	MAC10SC5	630	10%				
	MAC20SC5	560	20%				
	MAC30SC5	490	30%				
Série IX Sp LC3-800-5H	MAC0FC0Sp1	450	0%	0%	1350	225	0,8
	MAC30FC15Sp1	247,5	30%	15%			
	MAC0FC0Sp2	450	0%	0%	1350	225	1,8
	MAC30FC15Sp2	247,5	30%	15%			
	MAC30SC5Sp2						

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 Farés » de Médéa.

II.5.1 Essais effectués sur le sable

II.5.1.1 Equivalent de sable

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.11).

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 :

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

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

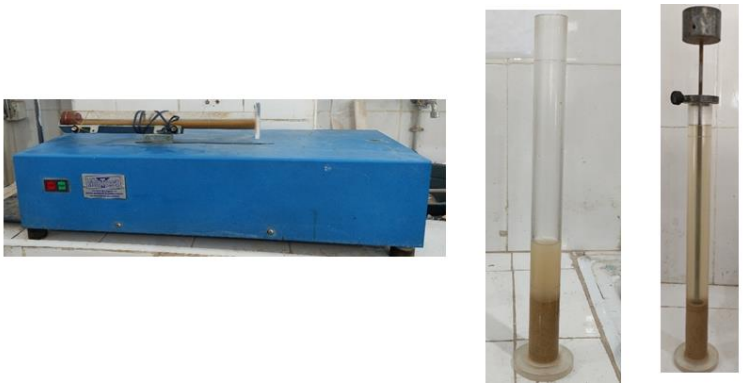


Figure II.11 : Essai d'équivalent de sable

II.5.1.2 Analyse granulométrique

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 selon la norme [EN 933-2].

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.12).



Figure II.12 **:** Tamiseuse électrique

II.5.1.3 Module de finesse

Le module de finesse MF d'un granulat étant presque exclusivement vérifié sur les sables. Selon la norme [EN 196-6], 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

Il s'agit de mesurer le volume absolu du sable selon la norme [NF P18-545] (Figure II.13).

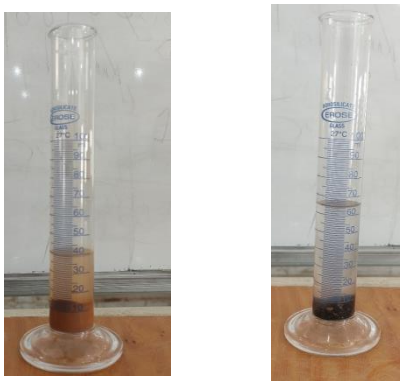


Figure II.13 : Mesure de la masse volumique

II.5.1.5 Surface Spécifique

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.14 : Détermination de la surface spécifique du ciment, de l'AC et du FC

II.5.2 Essais effectués sur mortier frais

II.5.2.1 Essais de consistance

1. **Objectif de l'essai**

   La constance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite " consistance normalisée".

2. Principe de l'assai

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constance selon la norme [EN196-3]. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évalue de cette manière sera appelée « consistance Vicat ».

3. Equipement nécessaire

-Une salle maintenue à 20°C ±2°C et à une humidité relative d'où moins 65%.

-Un malaxeur décrit dans la norme [EN 196-1]. Ce malaxeur et muni d'une cuve de 5 litres de consistance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente et rapide) : 140 et 285 tr/min.

-Un appareil de Vicat (du nom de l'ingénieur français Luis Vicat). L'appareil, schématisé sur (Figure II.15) est pour l'essentiellement composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde d'un diamètre $\emptyset$=10mm. La partie coulissant a une masse totale de 300 g (y compris la sonde amovible).

-Une balance permettant de peser à 1 g prés.

4. Conduite de l'essai

La quantité d'eau choisie est pesée de préférence directement dans la cuve du malaxeur. Puis on pèse 500g de ciment qui seront ajoutés à l'eau en un temps compris entre 5 et 10s, la quantité d'eau pesée et de 136g alors E/C= 0,272.

Mettre immédiatement le malaxeur en route à vitesse lente pendant 90s. Arrêter la machine pendant 15s et ramener, dans la gâchée, avec une petite truelle. La pâte adhérant à la cuve et se trouvant au-delà de la zone malaxage. Remettre la machine en route pour une durée 90s à vitesse lente.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le Tableau II.9.

Tableau II.9 : Protocole de malaxage de la pâte

Opérations	**Introduction de l'eau**		**Introduction du ciment**		**Raclage de la cuve**
Durée des opérations		5 à 10s	90s	15s	90s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

La pâte est alors rapidement introduits dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs ; il faut enlever l'excès de pate par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule ; puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

Quatre minutes après le début du malaxage la sonde est amenée à la surface supérieure de la pâte et lâchée sans élan. La sonde s'enfonce alors dans la pâte. Quand la sonde s'immobilise, ou au plus tard 30 secondes après l'avoir relâchée, on mesure la distance d entre l'extrémité de la sonde et le fonde du moule (Figure II.15). Cette distance d caractérise la consistance. Si d=6 mm ± 1 mm, la consistance est la consistance normalisée.

Si d n'atteint pas cette valeur, il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

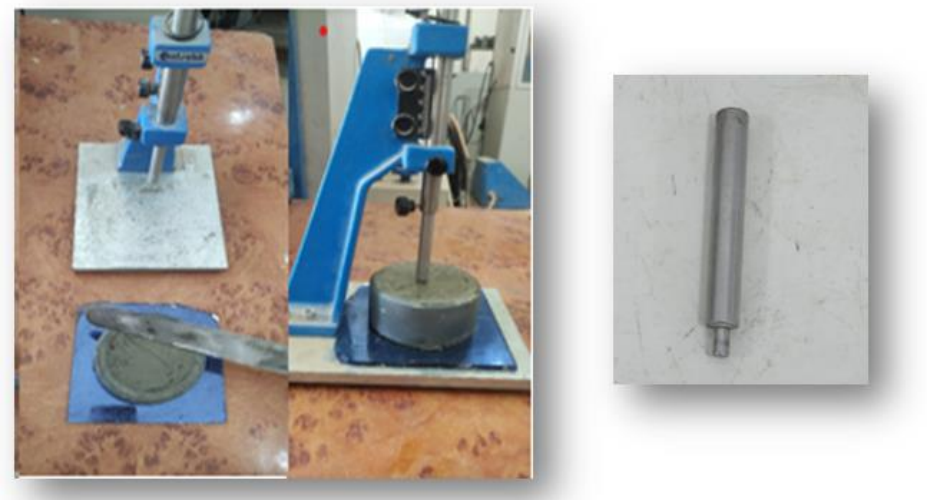


Figure II.15 : Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance

II.5.2.2 Essai mesure des temps de début et de fin de prise

1. **Objectif de l'essai**

Le début de prise dépend de plusieurs paramètres ; il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture du ciment étudié ; il dépend aussi de la température ambiante et, le cas échéant, des dosages en adjuvant. Utilisés à une même température et sans adjuvant deux ciments différents pourront se distinguer par une plus ou moins grande rapidité de prise. L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, un temps qui soit significatif de cette rapidité de prise [EN 196-3].

2. **Principe de l'essai**

L'essai consistance à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une charge de 300g, l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que d=4 mm ± 1 mm

On dite que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début malaxage, est appelé « temps de début de prise ».

Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5mm.

3. **Equipement nécessaire**

-Salle climatisée. L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de 20 °C ± 1 °C et dont l'humidité relative soit supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à 20 °C ± 1 °C.

-Malaxeur normalisé (Figure II.9).

-Appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1,13 mm (Figure II.15/II.16).

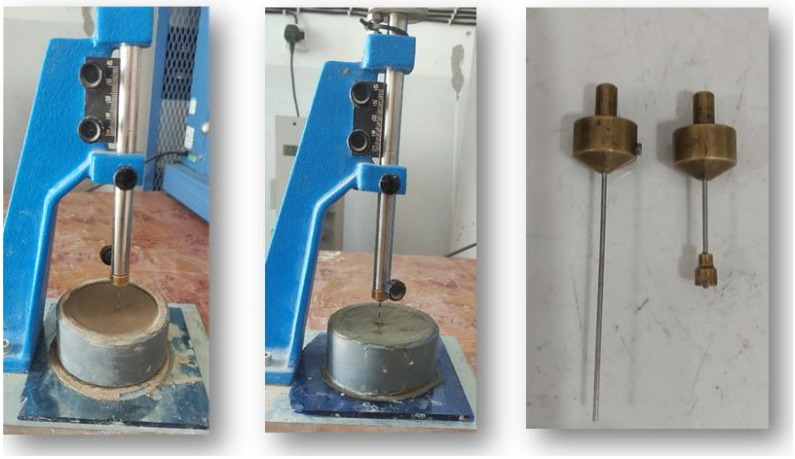


Figure II.16 : Détermination du temps de prise

II.5.2.3 Essai au Maniabilimètre

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 les normes NFP18-452et NFP15-37.

1. **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.

2. **Equipement nécessaire**

   L'appareil utilisé s'appelle Maniabilimètre B, il est schématisé sur (la Figure II.17). 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.17 : Maniabilimètre.

3. **Conduite de l'essai**

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en placeparpiquageen3couches.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.5.2.4 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 (Figure II.18) 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.

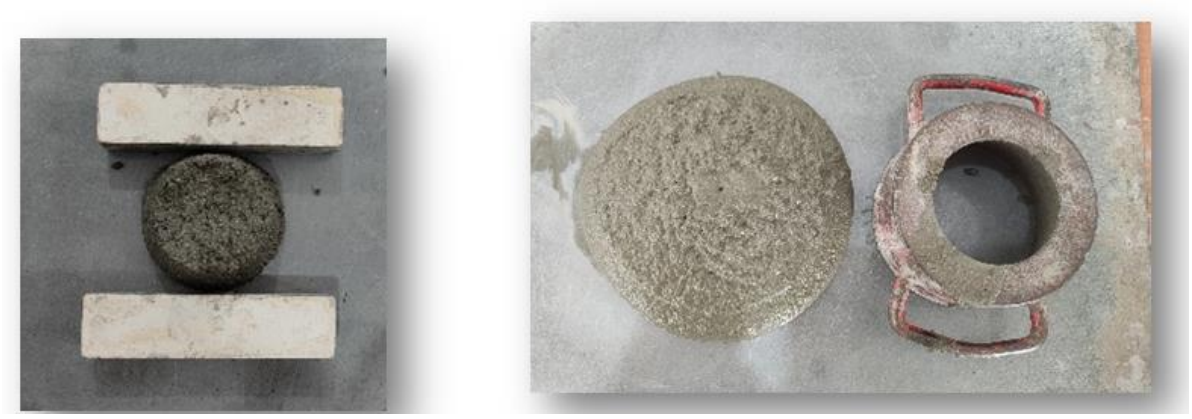


Figure II.18 : Essai d'affaissement pour le mortier

II.5.3 Essais réalisés à l'état durci

Les essais de caractérisation sur mortier durci sont résumes dans le Tableau II.10.

Tableau II.10 : Essais de caractérisation sur mortier à l'état durci

Essais	Appareil	Dimension (cm)
Compression à 7et28jours	La Presse hydraulique	4x4x16
Traction à 7et28jours		

II.5.3.1 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.19).

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

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.19 : Essai en flexion

II.5.3.2 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 (Figure II.20).

Si FC est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra : FC/(4x4)

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



Figure II.20 : Essai de compression



RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va exposer et analyser les résultats de l'étude expérimentale de différents essais effectués. Ces derniers seront divisés en deux parties :

La première partie porte sur les essais préliminaires sur les matériaux utilisés dans la confection du mortier (l'argile calcinée, le filler calcaire, le sable et le ciment), à savoir : la mesure de la densité, de début et de fin de prise, ainsi que la mesure de la surface spécifique.

Dans la deuxième partie, on va présenter et discuter des résultats de l'effet de l'argile calcinée sur les propriétés du mortier à l'état frais et durcis selon le protocole expérimental adopté.

III.2 Etude préliminaire sur les matériaux utilisés

Avant de procéder aux essais sur le mortier, on va commencer par les résultats des caractéristiques physiques du argile calcinée et filler calcaire

III.2.1 Mesure des caractéristiques physico-chimiques

Le Tableau III.1 donne les propriétés Physico-chimiques de l'argile calcinée et le filler calcaire. Il faut signaler que la mesure de la densité effectuée par la méthode des tubes. Cette dernière loin d'être précise. En revanche, le taux de carbonate de calcium ($CaCO_3$) a été mesuré par le calcimètre de Bernard, en mesurant le volume de CO_2 dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur $CaCO_3$.

Tableau III.1 : Propriétés Physico-chimiques de l'argile calcinée et du filler calcaire

	Densité	**$CaCO_3$ (%)**	**Bleu de méthylène (mg/l)**
Argile calcinée (AC1)	2,5	26,65*****	3,6
Argile calcinée (AC2)	2,5	25,42*****	4,2
Filler Calcaire (FC)	2,6	70,69	/
(*) : Cette valeur est mesurée par le calcimètre.			

III.2.2 Mesure de la finesse Blaine de l'argile calcinée et du filler calcaire

La surface spécifique du ciment, de l'argile calcinée et du filler calcaire a été mesurée par la méthode de surface Blaine en utilisant le perméabilimètre de Blaine selon la norme EN 196-6. Le Tableau III.2 présente les valeurs obtenues. D'après les résultats expérimentaux obtenus, on remarque que la surface spécifique de l'argile calcinée et filler calcaire augmente par rapport tel que ciment. Ça veut dire que les particules de l'argile calcinée et filler calcaire plus fine que le ciment.

Tableau III.2 : Propriétés Physico-chimiques du ciment et de l'AC1 et du FC gris

	Temps mesuré (s)	**Densité**	**Surface spécifique Blaine (cm^2/g)**
Ciment (OPC)	62,83	3,1	3241,30
Argile calcinée (AC1)	104,83	2,5	4991,91
Filler Calcaire (FCG)	71,87	2,6	4133,31

III.2.3 Mesure de la demande en eau pour la consistance normalisée et le temps de prise du ciment et LC3.

La mesure de la demande en eau pour la consistance normalisée consiste à déterminer le rapport E/C nécessaire pour remplir les conditions de la norme [EN196-3]. La même pâte a été utilisée pour mesurer le début de prise et la fin de prise du ciment et LC3. Le Tableau III.3 résume les résultats obtenus.

Tableau III.3 : Consistance et temps de prise du ciment

	Consistance (%)	**Début de prise**		**Fin de prise**	
		(heure)	**(min)**	**(heure)**	**(min)**
Ciment	27,2	2h43	163	3h31	211
LC3	31,0	3h20	200	4h21	291

D'après les résultats expérimentaux obtenus, on remarque que la pâte à base de LC3 (avec 30% d'AC et 15% du FC) montre un temps du début et de fin de prise plus important par rapport à la pâte de ciment.

III.2.4 Mesure de la perte au feu

Afin de déterminer le taux de carbonate de calcium approximatif, on va calculer la perte au feu entre 600 °C et 800 °C. Selon [Mehdizadeh et al., 2021], dans la plage 25–180 °C de calcination, il y aura la perte d'eau adsorbée. Dans la gamme 170–450 °C, la perte de masse est due à la présence d'impuretés et à la décomposition de la matière organique. La perte de masse entre 400 °C et 650 °C est due à la déshydroxylation de l'argile. Entre 650 °C et 900 °C, la perte de masse est due à la décarbonatation de la calcite selon l'équation suivante :

$$CaCO3 \rightarrow CaO + CO2 \quad \text{(III.1)}$$

En revanche, la teneur en calcite est déterminée à l'aide de l'équation suivante [Gnisci, 2022] :

$$CaCO3\ (\%) = W_{loss} x \frac{100,09}{44,01} \quad \text{(III.2)}$$

Avec : W_{loss} est la perte de masse entre 600–1000 °C due à la décarbonatation de la calcite.

100,09 et 44,01 : sont la masse molaire respectivement de la calcite (CaCO3) et du dioxyde de carbone (CO_2). Selon [Gnisci, 2022], la décomposition de la calcite commence approximativement à 600 °C et atteint son maximum entre 760 et 790 °C. Ainsi, [Siline et al., 2016], ont trouvé que la décarbonatation commence significativement (supérieure à 35 %) au-delà de calcination à 700 °C pendant 5 h. cependant, l'argile est complètement décarbonatée à 1000 °C.

Tableau III.4 : Perte au feu et taux de calcite dans l'argile A1

Température de Calcination	**m_0 (g)***	**m_f (g)****	**Perte en masse (g)**	**Perte au feu (%)**	**W_{loss} entre 600 et 800°C (%)**	**$CaCO_3$ (%)**
600 °C	256,7	240,7	16	6,2	11,5	26,1
800 °C	175,7	144,6	31,1	17,7		

Finalement, on a trouvé un taux de $CaCO_3$ vaut 26,1%. La valeur obtenue par le calcimètre est égale à 26,65%. Donc, ça confirme que cette méthode est fiable pour la détermination du taux de calcite dans les argiles.

III.3 Effet de l'argile calcinée et du filler calcaire sur les propriétés du mortier

Dans cette partie, on a effectué plusieurs séries de mortier à base d'argile calcinée et calcaire (LC2) en substituant le ciment jusqu'à 30% d'AC (avec pas de 10%) et 15% du FC (avec pas de 5%), tout en faisant varier un seul paramètre dans la même série. Il est à noter que pour toutes les séries étudiées, à l'exception la série de l'influence de la température, on a adopté la température de calcination de 800°C pendant 5 heures, réputée par sa réactivité optimale selon la littérature. Cette dernière sera considérée comme la température de référence pour notre travail. Pour l'étude de l'effet de la température et de la durée de calcination de part et l'effet de l'ajout de superplastifiant (Sp) d'autre part, on a adopté pourcentages optimums obtenus par plusieurs travaux de recherche, donne les meilleurs résultats en utilisant le LC3. Le liant (LC3) étudié est constitué par : 30% d'AC, 15% du FC et 55% du ciment (OPC). Une dernière série étudiée, était à la base du sable de concassage contenant 5% de filler calcaire et la substitution du ciment a été faite seulement par l'AC jusqu'à 30% avec un pas de 10%.

III.3.1 Influence du type d'argile et du type de calcaire (série I)

Dans la série I, on va utiliser la fameuse composition du LC3 (30% d'AC et 15 du FC), en adoptant la composition du mortier normal (1 part du ciment – 3 parts du sable – ½ part d'eau), et on comparera le comportement du mortier en utilisant deux types d'argile

(argile bleuâtre (AC1) et argile jaunâtre (AC2)) et deux types du filler calcaire (blanc (FCB) et garis (FCG)).

III.3.1.1 Etat frais

La Figure III.1 présente l'évolution du temps d'écoulement en fonction du type d'argile calcinée (AC1/ AC2) et du type de filler calcaire (FCB/FCG). On remarque que la substitution du ciment par l'argile calcinée conduit à une augmentation de temps d'écoulement. Ce résultat est en accord avec la littérature où l'incorporation de l'argile calcinée conduit à une perte d'ouvrabilité et une demande en eau et en superplastifiant plus élevée. En revanche, l'AC2 affecte l'ouvrabilité plus que l'AC1. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la teneur en argile dans l'argile jaunâtre à l'état brut, comme il est montré par la valeur de bleu de méthylène plus élevée de cette argile (Tableau III.1). En ce qui concerne le filler calcaire, il est clair que le FCG affecte l'ouvrabilité plus que le FCB.

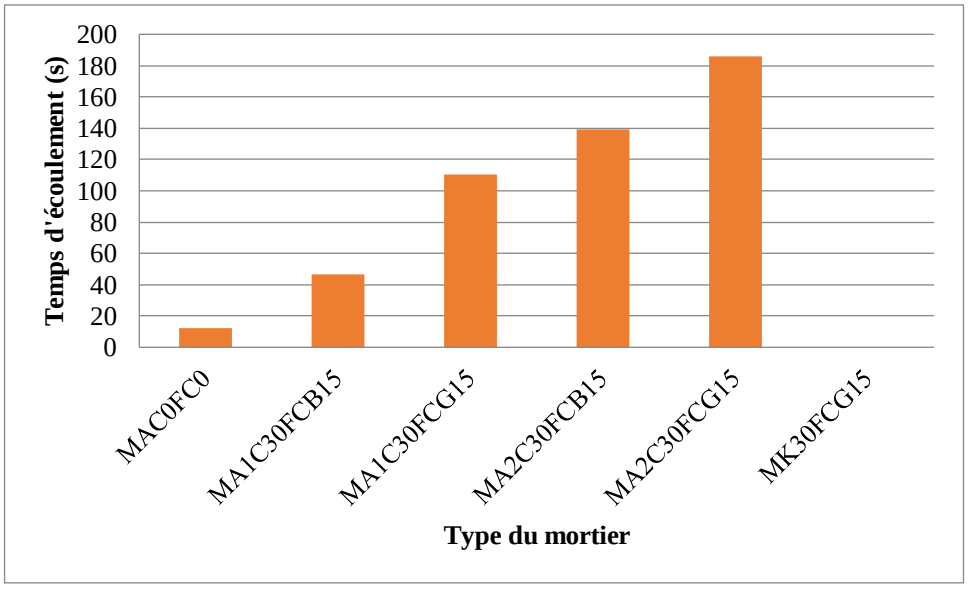


Figure III.1 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du type d'argile calcinée (AC1/ AC2) et du type de filler calcaire (FCB/FCG)

III.3.1.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.2, illustre l'évolution de la résistance à la compression du mortier, à 7 jours et à 28 jours de la série I, en fonction du type de l'AC (AC1/ AC2) et du FC (FCB/FCG). D'après cette figure, on remarque que le meilleur mélange est celui à base FCG. Par contre, la différence entre AC1 et AC2 est marginale.

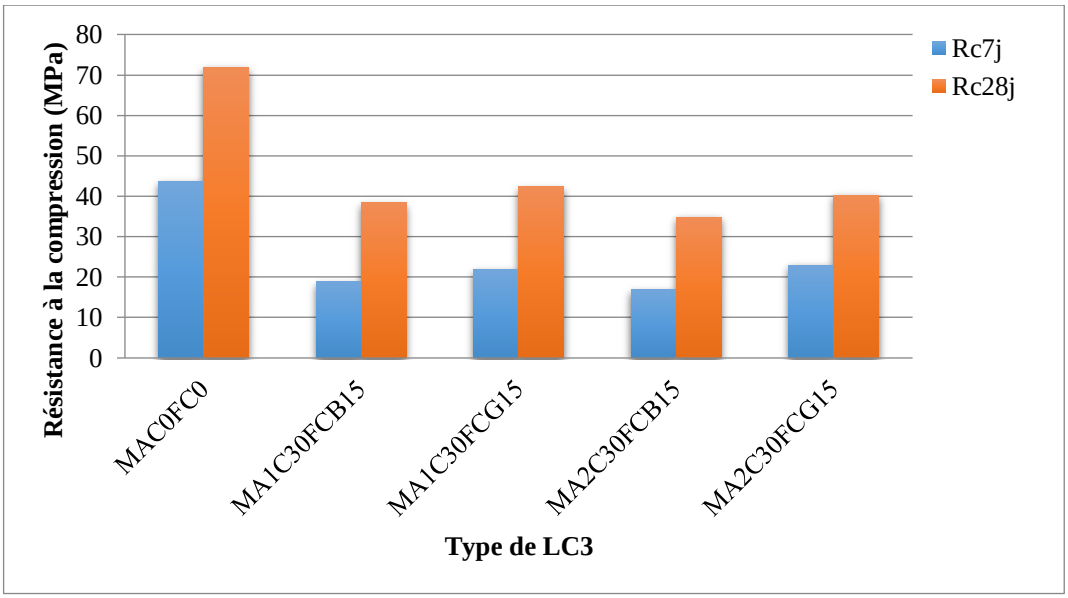


Figure III.2 : Evolution de la résistance à la compression du mortier, à 7 et à 28 jours, en fonction du type de l'AC (AC1/ AC2) et du FC (FCB/FCG)

Cependant, il est clair que la résistance de tous les mélanges chute à plus de 60%, par rapport au témoin (MAC0FC0). Ce résultat indique que la substitution de 30% d'AC et 15% de FC ne satisfait pas aux conditions de la norme ASTM C618, qui exige au moins 75% de la résistance du témoin à 7 ou 28 jours pour que le matériau cimentaire supplémentaire (SCM) soit acceptable.

ii) Résistance à la traction par flexion

La Figure III.3, illustre l'évolution de la résistance à la traction par flexion du mortier, à 7 jours et à 28 jours de la série I. De même comme pour la résistance à la compression, on remarque que le mélange A1C30FCG15 donne la meilleure résistance par rapport aux autres mortiers.

Finalement, on peut conclure que la meilleure combinaison pour concevoir le ciment argile calcinée et calcaire (LC3), est obtenue par l'AC1 et FCG. Par contre, on doit adopter un protocole expérimental adéquat pour déterminer les pourcentages optimums des l'AC1 et FCG dans le ciment pour avoir une résistance supérieure ou égale 75% de la résistance du témoin.

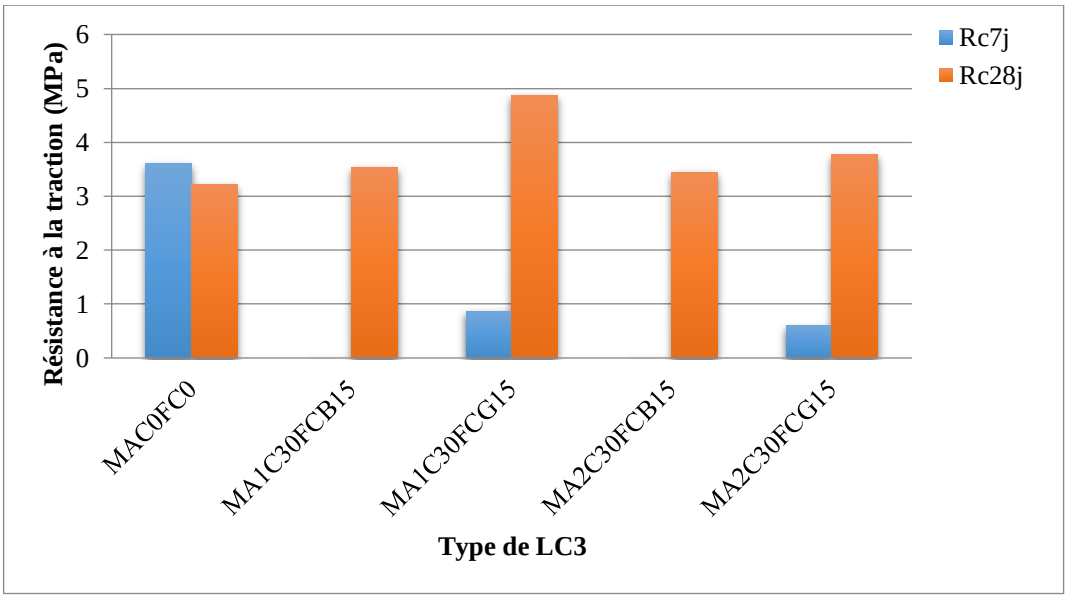


Figure III.3 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du mortier, à 7 et à 28 jours, en fonction du type de l'AC (AC1/ AC2) et du FC (FCB/FCG)

III.3.2 Effet de la température de calcination (série II)

III.3.2.1 Etat frais

Dans la série II, on a confectionné des mortiers à base de LC3 (55% du ciment, 30% d'AC1 et 15% du FC) en variant la température et la durée de calcination comme suit : 500, 600, 700 et 800°C, pendant 1, 3 et 5 heures. La mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre est illustrée sur la Figure III.4.

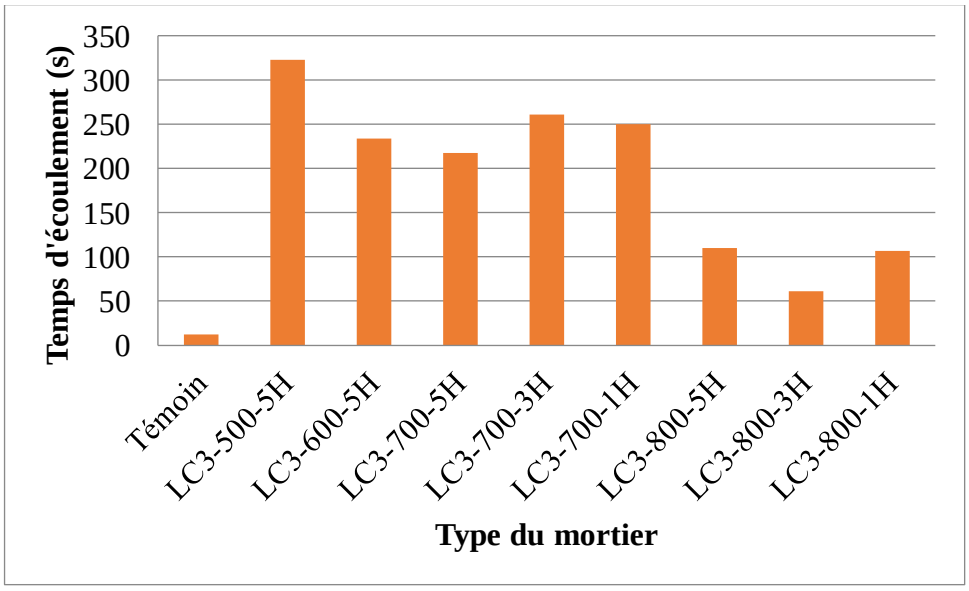


Figure III.4 : Evolution du temps d'écoulement en fonction de la température de calcination

D'après la figure (III.4), on remarque que la meilleure maniabilité en mesurant le temps d'écoulement par le maniabilimètre a été obtenue le mortier à base d'argile calcinée à 800°C pendant 3H.

III.3.2.2 Etat durci

i) Résistance à la compression 7 et 28 jours

D'après la Figure III.5, on remarque que la résistance mécanique à la compression diminue et le meilleur mélange qui donne la plus grande résistance à la compression c'est LC3 600°C-5H. On peut dire que du meilleur on utilise la calcination de 600°C pendant 5H, qui donne une résistance mieux que 800°C-5H.

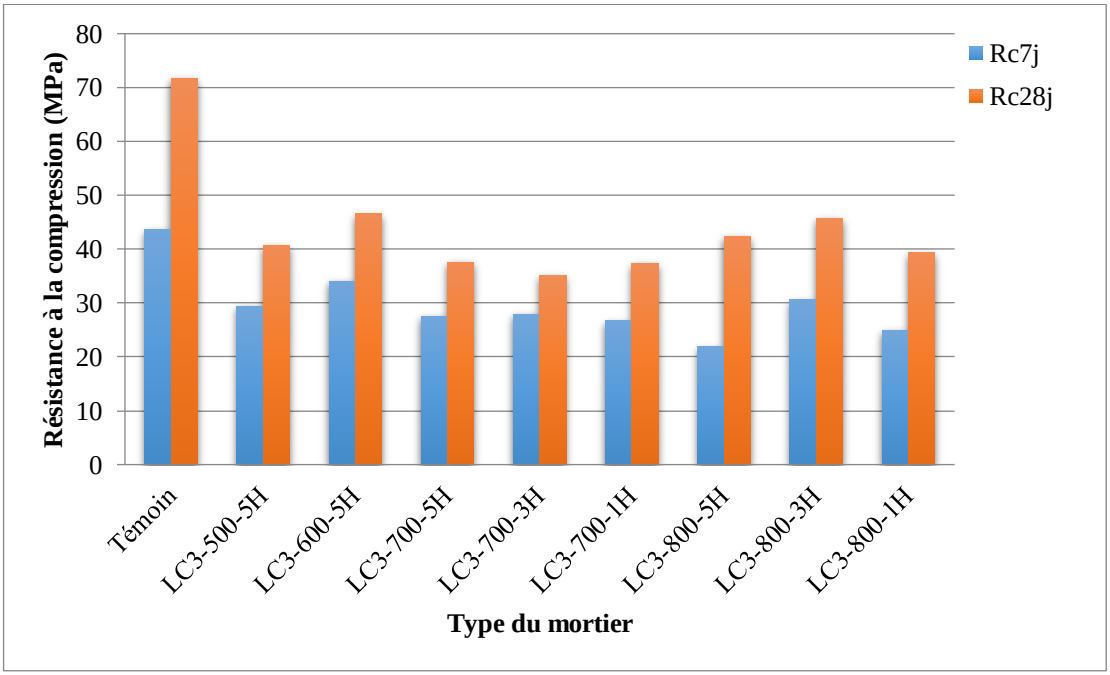


Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la température de calcination

ii) Résistance à la traction par flexion

D'après la Figure III.6, on remarque que la résistance diminue et le LC3 700°C-5H donne la meilleure valeur par rapport aux autres à l'âge de 7 jours. Par contre à l'âge de 28 jours, la résistance à la traction augmente. On remarque que LC3 800°C-3H le meilleur par rapport les autres. Ce résultat montre que pour notre argile, le protocole de calcination optimum est 800°C pendant 3 heures et non pas 5 heures, comme on l'a considérée selon notre recherche bibliographique.

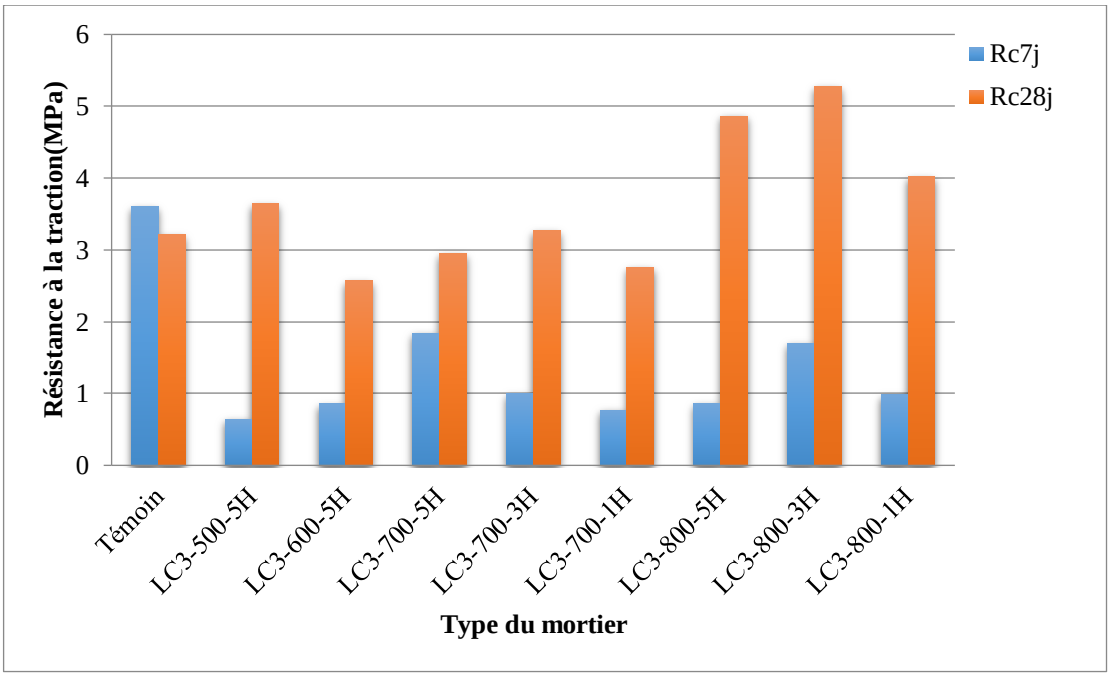


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la température de calcination

Malheureusement, puisque on n'a pas le temps nécessaire pour commencer par cette et appliquer ce résultat sur les autres séries. En effet, on a effectué cette série en parallèle avec les autres séries où on a adopté une température de 800°C pendant 5 heures comme protocole de référence.

III.3.3 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC sans FC (série III)

III.3.3.1 Etat frais

Les résultats de temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'argile calcinée sont représentés dans la Figure III.7. On remarque que la substitution du ciment par l'argile calcinée conduit à une augmentation de temps d'écoulement. Ceci pourrait être attribué à la nature hautement cohésive de l'argile calcinée par rapport au ciment Portland, résultant de sa grande finesse. Ainsi, l'augmentation de la teneur en l'argile jusqu'à 30%, conduit à une demande d'une quantité d'eau supplémentaire pour mouiller la surface des particules. Selon [Nair et al., 2020], l'un des problèmes liés à l'utilisation d'argiles calcinées est l'augmentation de la demande en eau en raison de la finesse élevée, causée par la structure en feuille, et de la distribution granulométrique étroite de l'argile.

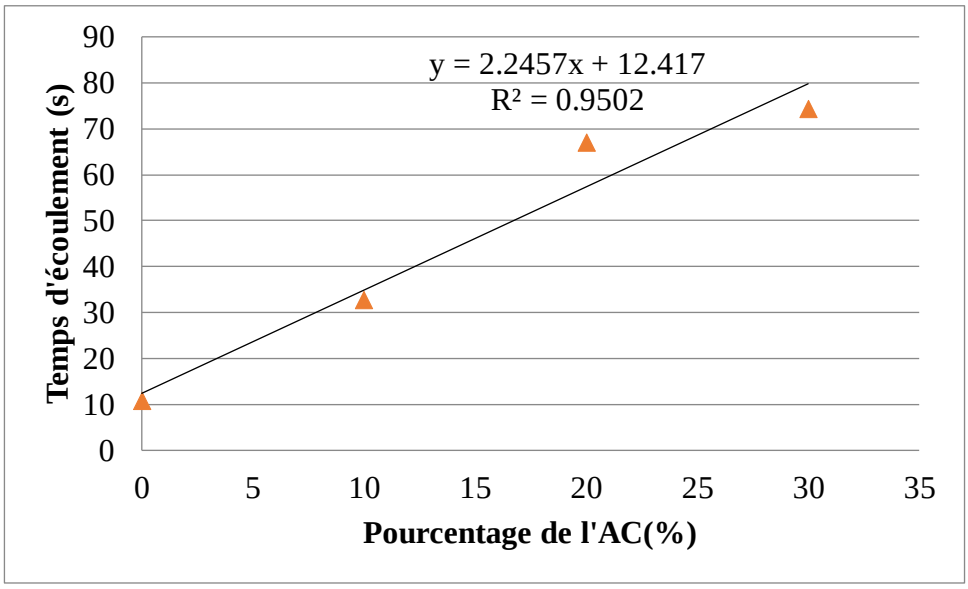


Figure III.7 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment sans FC

En revanche, on peut constater que la variation du temps d'écoulement est linéaire et peut être modélisée avec une équation ayant un coefficient de corrélation R^2 =0,95.

III.3.3.2 Etat durci

i) Résistance à la compression 7 et 28 jours

Les résultats de la résistance à la compression obtenus à 7 et 28 jours sont donnés par la Figure III.8. Cette dernière montre l'effet de l'augmentation du pourcentage de l'argile calcinée, de 10 jusqu'à 20%, dans le ciment sur la résistance à la compression. Les résultats obtenus indiquent une importante influence sur la résistance mécanique à la compression des mortiers par la substitution du ciment par l'argile calcinée. Du point de vue technique, l'effet de la dilution est dominant ici que l'effet pouzzolanique de l'AC. Cet effet est amplifié avec la perte de l'ouvrabilité provoquée par l'AC (Figure III.7). Cette perte provoque une diminution de la compacité du mortier à l'état durci, en augmentant les pores interparticulaire. Ce qui conduit à affaiblir la structure interne du mortier et en conséquence diminuer la résistance.

Parallèlement à cette série, on a confectionné un mortier à base de 30% d'argile brute (A1), sans calcination. La résistance à 28 jours enregistrée pour ce mortier vaut 31,58 MPa, qui présente une chute de 56% de la résistance par ra. En revanche, la diminution de la résistance est estimée à 30%, en utilisant une AC. Ceci montre que la calcination augmente l'activité de l'argile. Il reste seulement à trouver la substitution optimale avec le ciment.

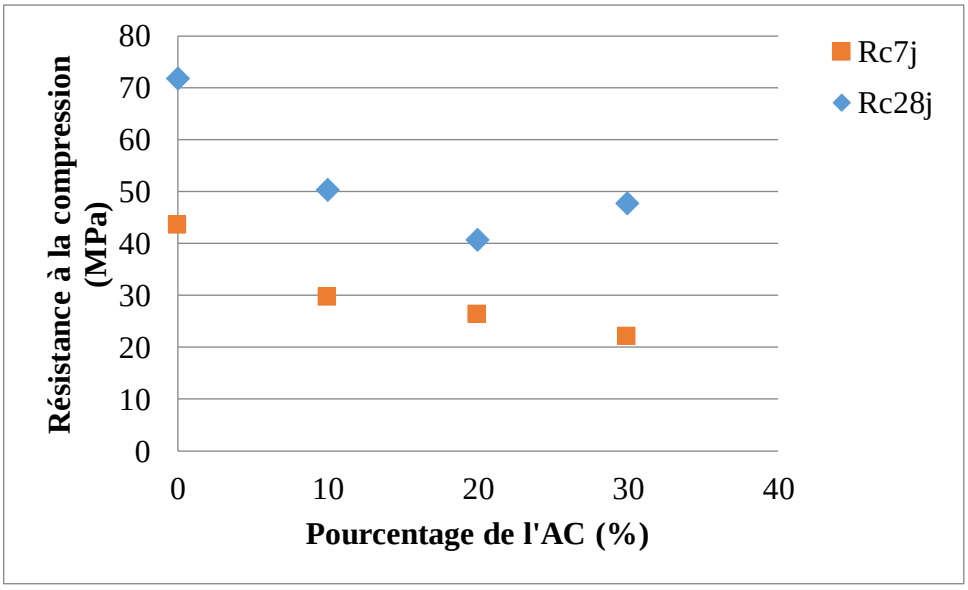


Figure III.8 : Evolution de la résistance relative à la compression du mortier en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment sans FC

ii) Résistance à la traction par flexion

Les résultats obtenus et présentés sur la Figure III.9 montrent que l'augmentation du pourcentage de l'argile calcinée dans le LC3 n'a pas une influence sur la résistance à 7 jours. Par contre, cette augmentation affecte négativement la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours.

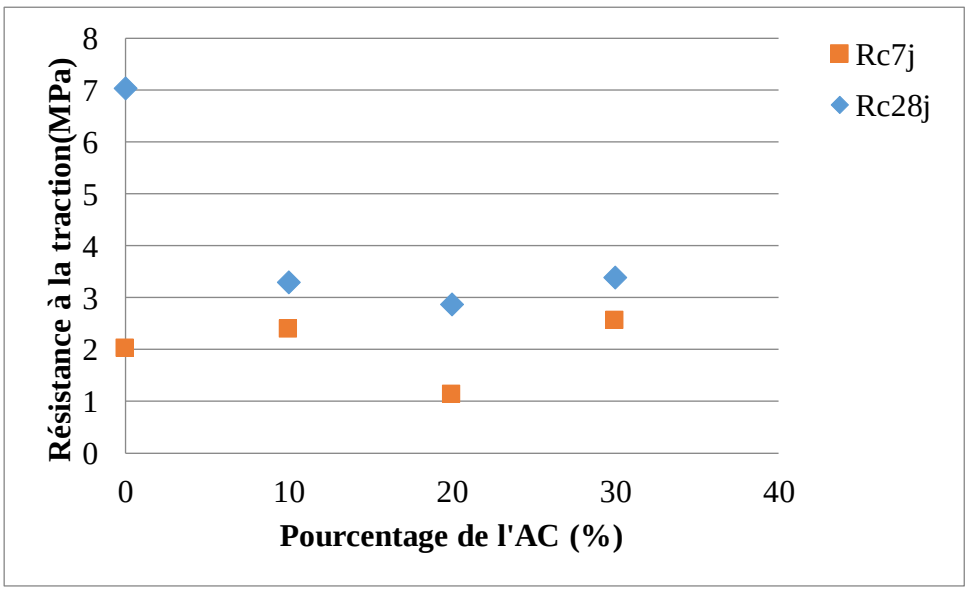


Figure III.9 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment sans FC

III.3.4 Effet de la substitution massique du ciment par le FC sans AC (série IV)

III.3.4.1 Etat frais

Dans cette série, on a confectionné des mortiers à base de filler calcaire en substitution massique avec le ciment de jusqu'à 15%, avec pas de 5%.

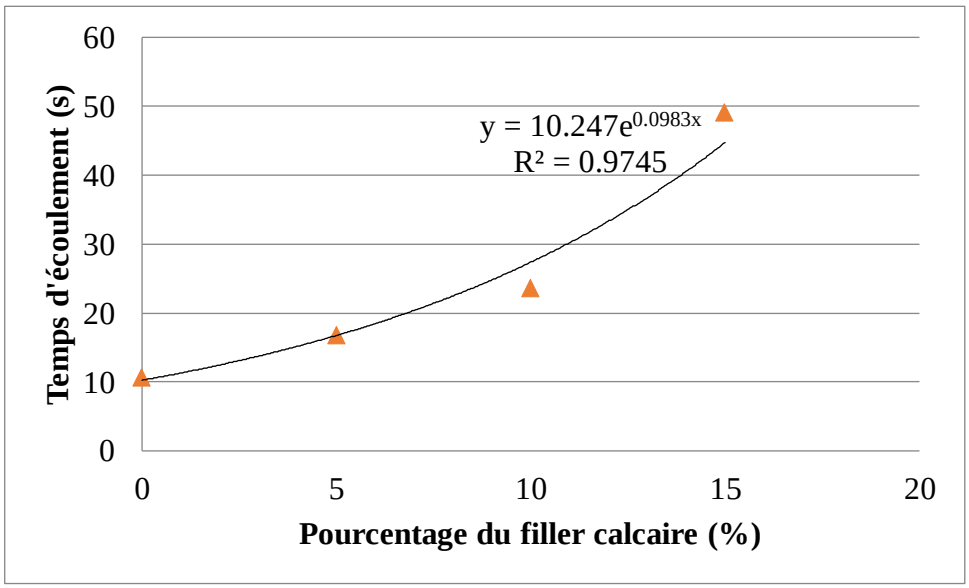


Figure III.10 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage du FC dans le ciment sans AC

Les résultats du temps d'écoulement en fonction de la substitution du ciment par le filler calcaire gris sont représentés sur la Figure III.10. On remarque que la substituions du ciment par les filler calcaires conduit à une augmentation du temps d'écoulement. Dans cette série, l'évolution est exponentielle, avec R^2=0,97. En effet, jusqu'à 10%, l'effet était marginale. Mais pour 15% du filler calcaire dans le ciment, le temps d'écoulement augmente 5 fois. Ceci pourrait attribuer à la morphologie des grains du FC concassé. Ce qui augmente le frottement interparticulaire. Ainsi, la finesse du FC conduit à une demande en eau plus importante. Tout ça affecte négativement l'ouvrabilité, ce qui traduit par l'augmentation du temps d'écoulement au maniabilimètre.

III.3.4.2 Etat durci

i) Résistance à la compression 7 et 28 jours

Selon la Figure III.11, l'augmentation du pourcentage du filler calcaire provoque une légère diminution de la résistance à la compression à 28 jours. Par contre, à 7 jours, il n'y a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression. La diminution de la résistance peut être

attribuée à l'augmentation de la fraction volumique du calcaire dans les mélanges et la diminution de la quantité du clinker dans le ciment. C'est ce qu'on appelle l'effet de dilution. L'évolution de la résistance à 7 et à 28 jours, suit une droite décroissante.

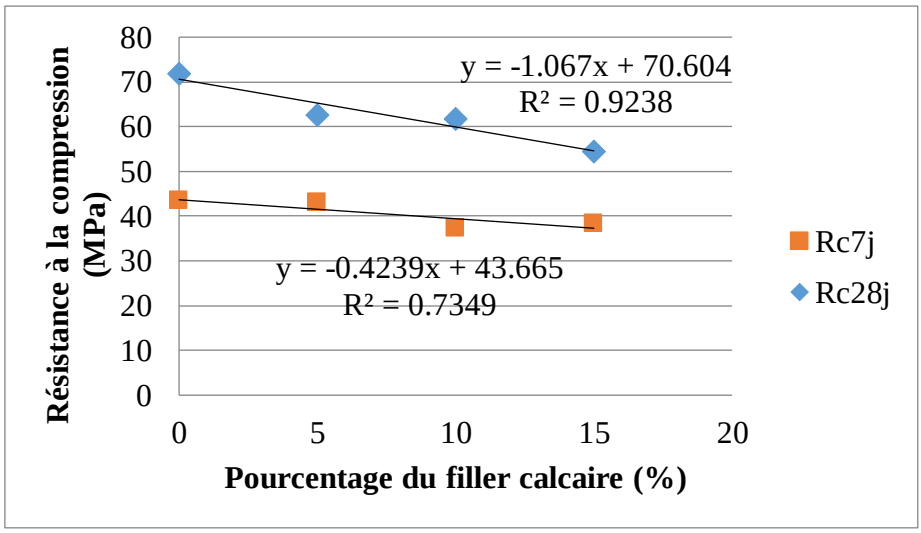


Figure III.11 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage du FC dans le ciment, sans AC

ii) Résistance à la traction par flexion

D'après les résultats de la Figure III.12, une augmentation de la résistance en flexion à 7 jours a été enregistrée. Mais, à 28 jours, la résistance diminue en fonction de l'augmentation du filler calcaire dans le ciment.

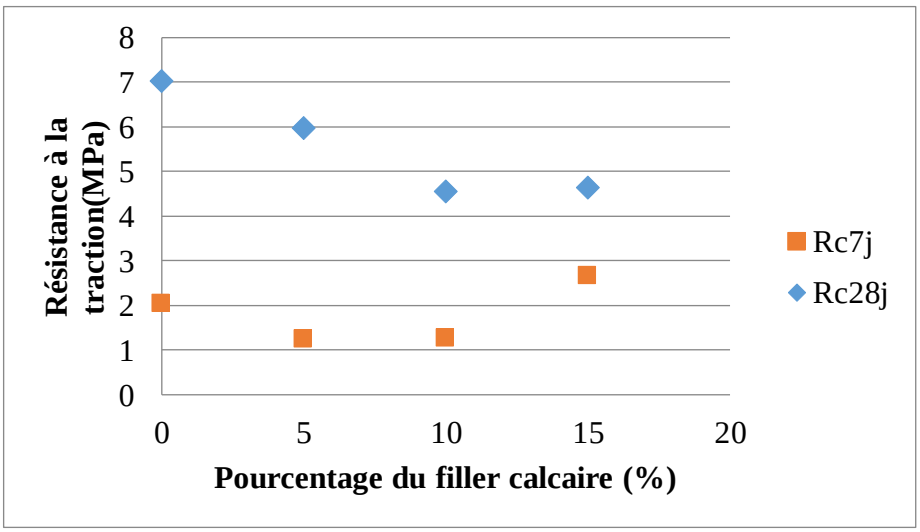


Figure III.12 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage du FC dans le ciment, sans AC

III.3.5 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC avec 5% du FC (série V)

III.3.5.1 Etat frais

Dans cette série, on a confectionné des mortiers à base de l'AC (de 0 à 30% de substitution), avec un taux fixe du FC vaut 5%, dans le ciment.

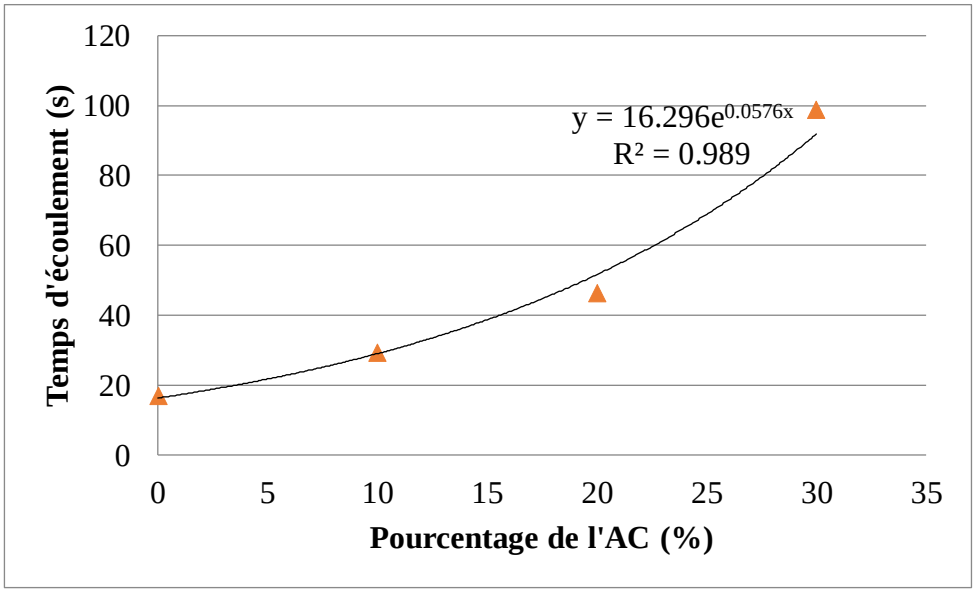


Figure III.13 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC avec 5% du FC

Selon la Figure III.13, on remarque que la substitution du ciment par l'AC en présence de 5% FC conduit à une augmentation du temps d'écoulement moins rapide par rapport au mortier avec le même pourcentage d'AC, mais sans FC (Figure III.7).

III.3.5.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.14 montre l'effet de l'augmentation du pourcentage de l'AC avec 5% du FC. On constate que l'augmentation du pourcentage de substitution conduit à une diminution de la résistance à la compression à 7 et 28 jours. On remarque aussi que le développement de la résistance à la compression entre 7 et 28 jours, diminue au fur et à mesure que le pourcentage de l'AC augmente, notamment avec 20% d'AC.

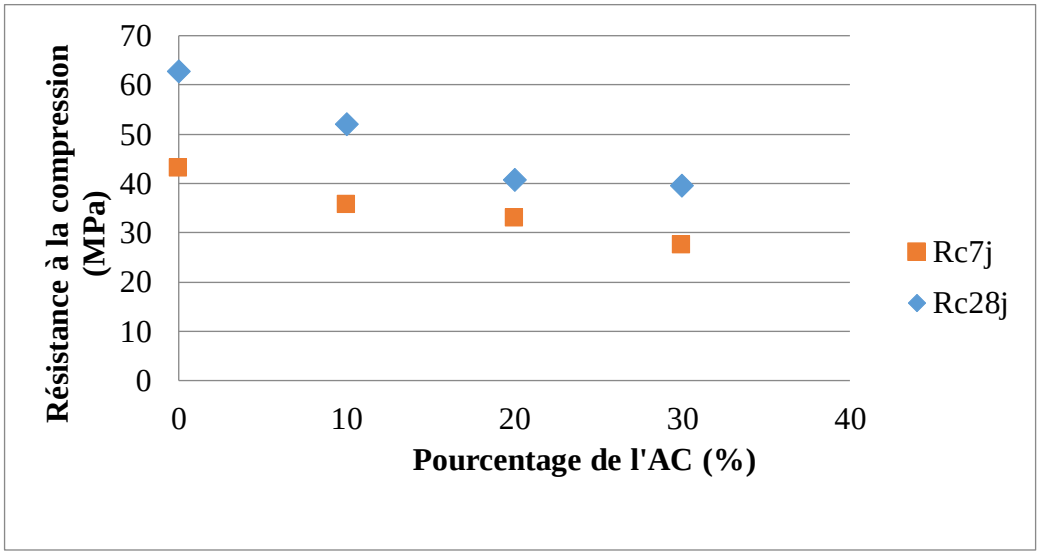


Figure III.14 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de l'AC avec 5% du FC

ii) Résistance à la traction par flexion

La Figure III.15, illustre l'évolution de la résistance à la traction par flexion du mortier en fonction du pourcentage de l'AC avec 5% du FC dans le ciment. D'après ces résultats, une augmentation de la résistance en flexion a été enregistrée à l'âge de 7 jours, par rapport au mortier témoin de cette série (5% du FC et 0% AC). Par contre, à 28 jours, la résistance diminue légèrement par rapport au témoin.

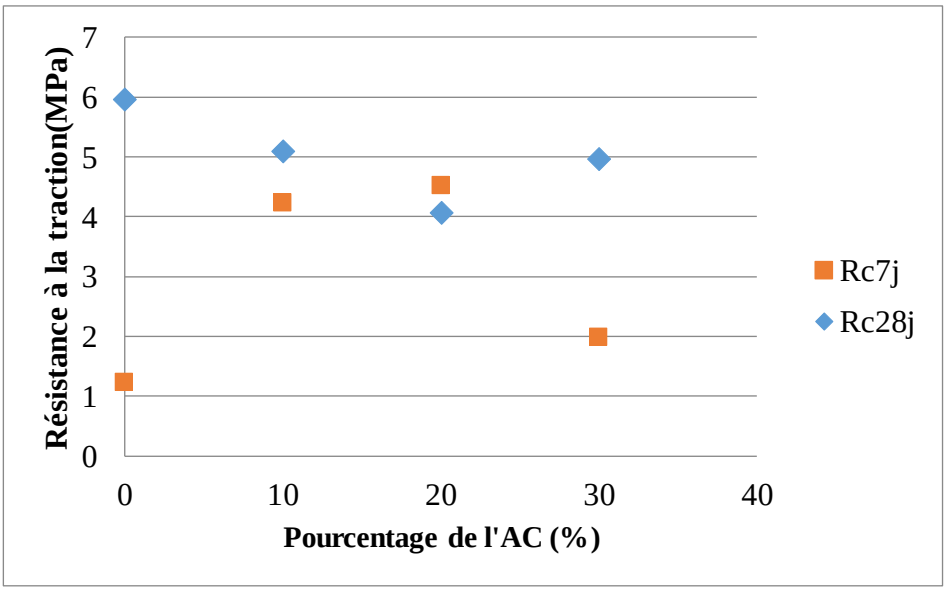


Figure III.15 : Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction du pourcentage de l'AC avec 5% du FC

III.3.6 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC avec 10% du FC (Série VI)

III.3.6.1 Etat frais

Dans cette série, on a confectionné des mortiers contient de 0 à 30% dans le ciment, avec pas de 10%, et un taux fixe du FC vaut 10%. L'évolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC est présentée par la Figure III.16.

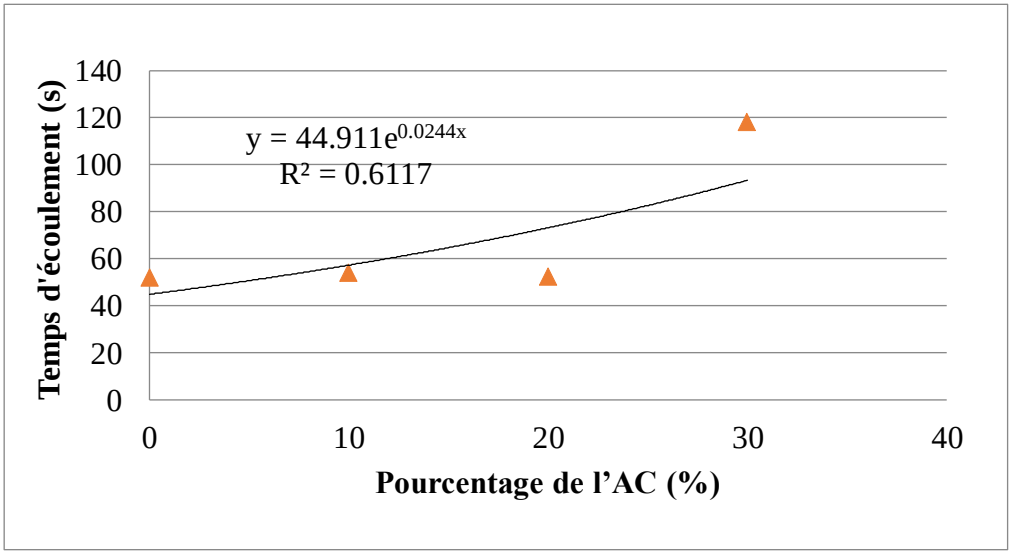


Figure III.16 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC

Les résultats obtenus pour cette série montrent que jusqu'à 20% d'AC, il n'y a pas d'effet clair du l'AC sur le temps d'écoulement à travers le maniabilimètre. Il faut toujours garder dans l'esprit que la comparaison dans cette série a été faite par rapport à un mortier, qui contient aussi 10% du FC dans le ciment. Cependant, 30% D'AC dans le ciment a doublé le temps d'écoulement du mortier.

III.3.6.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.17 présente l'évolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC. Selon cette figure, on remarque qu'une augmentation de la résistance à la compression a été enregistrée à 28 jours, jusqu'à 20% d'AC. Ensuite, une légère perte a été obtenue avec 30% d'AC. Pratiquement, la même observation a été obtenue à 7 jours.

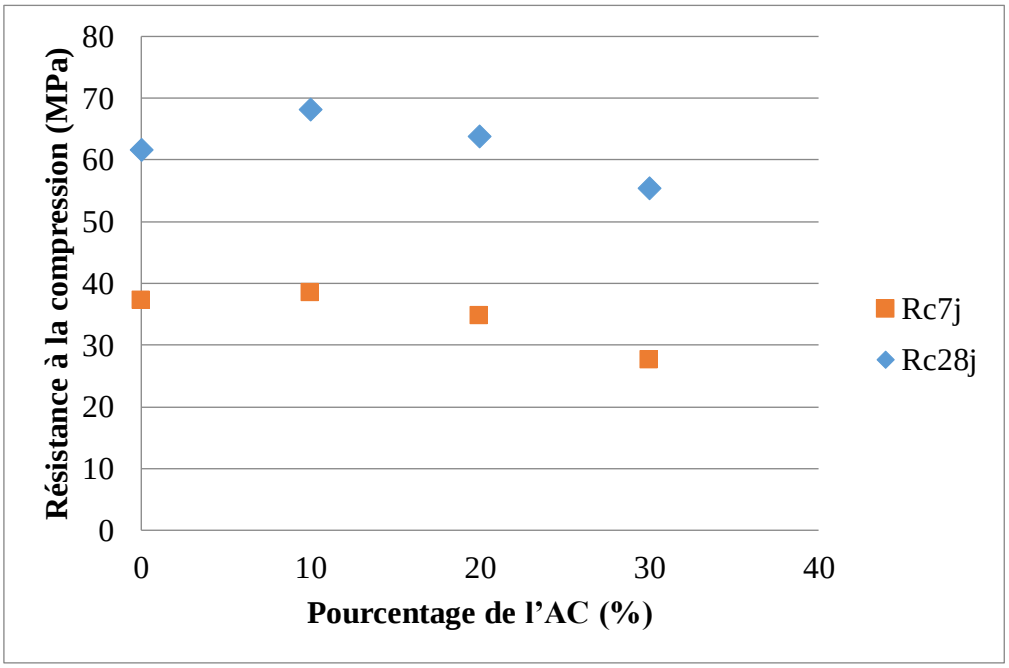


Figure III.17 : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC

Cependant, le point fort de cette série c'est d'avoir une résistance nettement supérieure à 75%, exigée par la norme ASTM C618, de la résistance du mortier témoin de la série III (sans AC et sans FC). Ce résultat est très prometteur du point de vue valorisation de ce type d'argile local.

ii) Résistance à la traction par flexion

D'après la Figure III.18, on peut constater que la résistance à la traction par flexion, à 7 et 28 jours, a été améliorée par l'augmentation du pourcentage du l'AC dans le ciment, avec une valeur optimale à 20% d'AC.

Donc, on peut donc dire que pour la résistance mécanique à la compression et à la traction ainsi que l'ouvrabilité du mortier, la teneur optimale du liant LC3 est : 20% d'argile calcinée et 10% du filler calcaire. Cependant, un liant LC3 contenant 30% d'argile calcinée et 10% du filler calcaire est aussi acceptable, selon la norme ASTM C618.

A cet effet, il est fortement recommandé de refaire cette série ou bien les deux mortiers, à 20 et 30% d'AC en utilisant cette fois ci une argile calcinée à 800°C pendant 3 heures seulement et non pas 5 heures : c'est la température optimale obtenue par l'analyse des résultats de la série II.

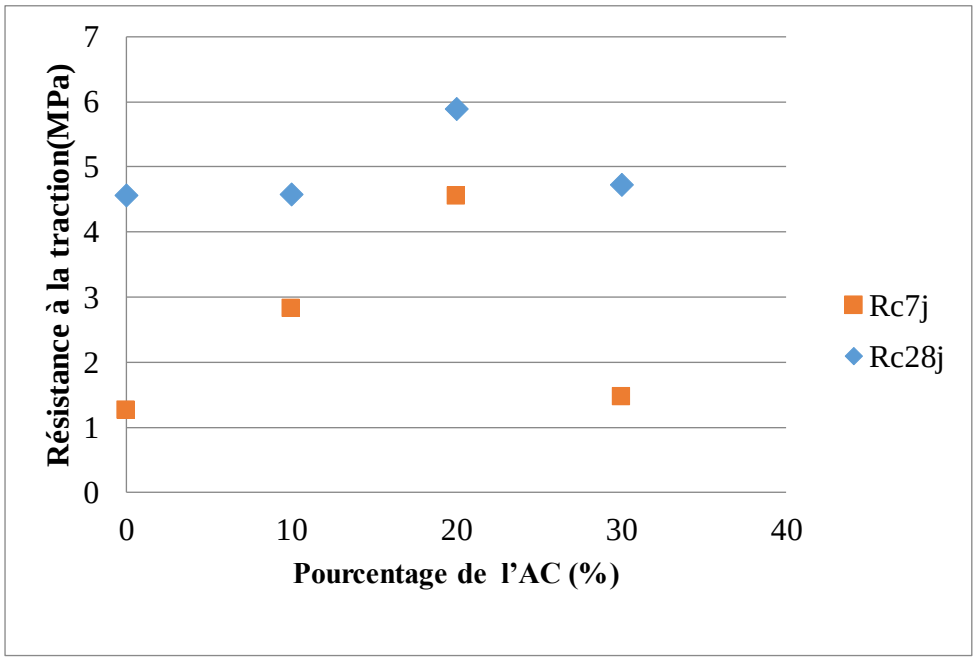


Figure III.18 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de l'AC avec 10% du FC

III.3.7 Effet de la substitution massique du ciment par l'AC avec 15% du FC (Série VII)

III.3.7.1 Etat frais

Dans cette série, on a confectionné des mortiers à base de l'AC de 0 à 30% avec un pas de 10% et un taux fixe du FC, vaut 15% dans le ciment.

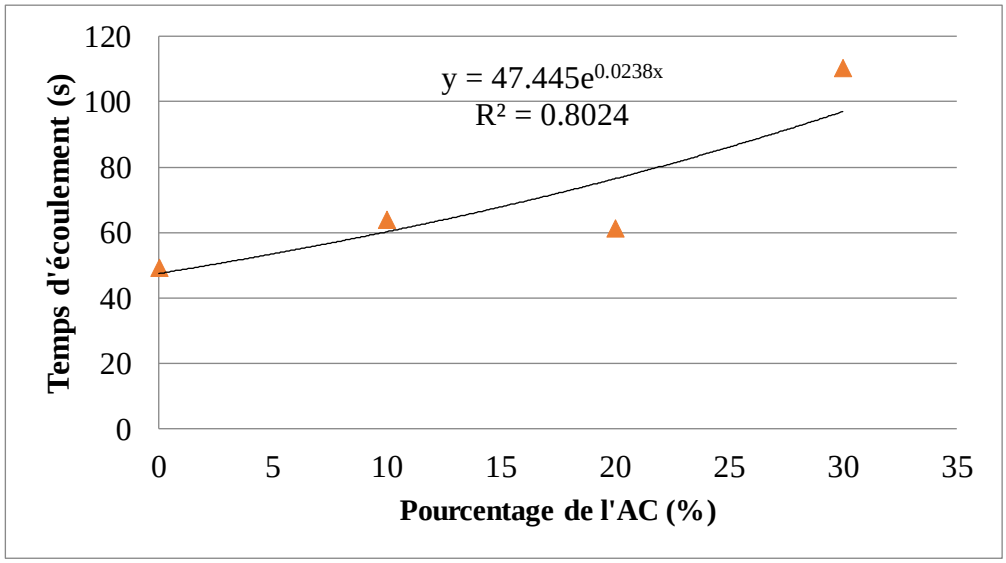


Figure III.19 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC

L'allure de l'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC comme taux fixe (Figure III.19) est tout à fait comme celle de la série précédente numéro VI (voir Figure III.16). On remarque toujours qu'il y a pas d'effet jusqu'à 20% d'AC. Ensuite, on a eu presque le double du temps d'écoulement pour 30% d'AC.

III.3.7.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

Contrairement à l'évolution du temps d'écoulement, l'allure de la résistance mécanique à la compression, à 7 et à 28 jours, du mortier contient 15% du FC dans le ciment, montre une diminution en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'AC (Figure III.20).

Ainsi, les résultats obtenus à 28 jours montrent une résistance allant de 75 % jusqu'à 60%, respectivement pour 0 et 30% d'AC, par rapport au mortier témoin à base de 100% du ciment.

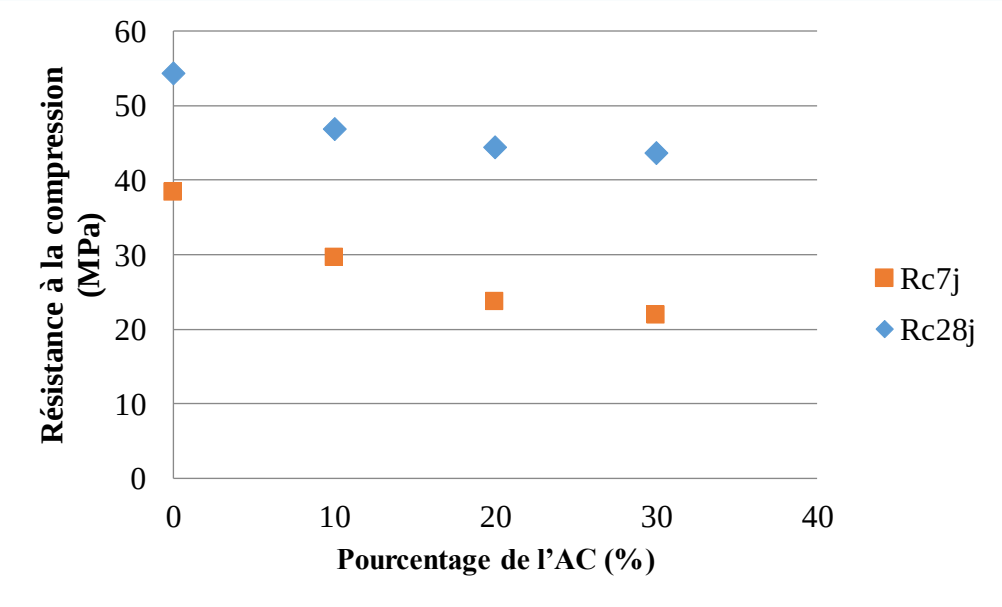


Figure III.20 : Evolution de la résistance relative à la compression des mortiers en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC

ii) Résistance à la traction par flexion 7 et 28 jours

D'après les résultats illustrés sur la Figure III.21, une augmentation du pourcentage de l'AC augmente la résistance à la flexion à l'âge 28 jours même avec 30% d'AC. Par contre, on peut

constater que l'augmentation de l'AC dans le ciment sur le mortier, à l'âge 7 jours, affecte négativement la résistance à la traction par flexion.

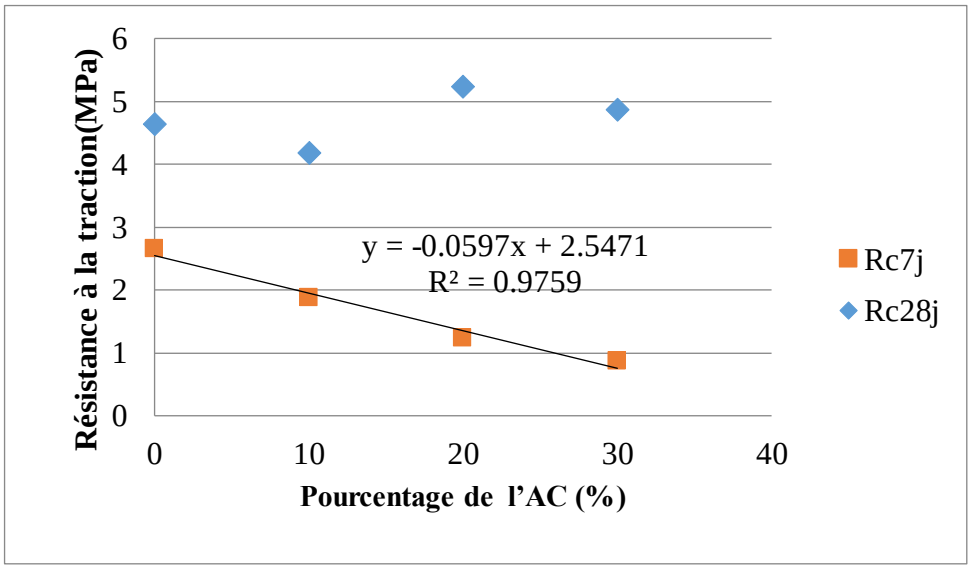


Figure III.21 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de l'AC avec 15% du FC

III.3.8 Effet de l'argile calcinée sur les propriétés du mortier à base du sable concassé calcaire (série VIII)

III.3.8.1 Etat frais

Afin d'étudier l'effet de la nature du sable sur les propriétés du mortier LC3 à l'état frais et à l'état durci, on a utilisé un sable de concassage calcaire (SC) au lieu du sable roulé (SR) utilisé jusqu'à maintenant. On a confectionné série similaire à série III (sans FC dans le ciment), mais à base de SC, origine du filler calcaire gris. Cependant, afin de bénéficier de l'effet positif du filler en profitant de l'activité pouzzolanique de l'argile calcinée, on a utilisé un SC avec 5% du filler calcaire (fraction inférieure à 80µm). Sachant que la composition du mortier étudié est celle du mortier normal : 3 parts du sable et 1 part du ciment. Il en résulte une quantité du FC vaut 15% de la masse du liant dans le mortier.

Par ailleurs, il est à noter qu'une quantité d'eau supplémentaire a été ajoutée dans le but de compenser le taux d'absorption du SC, vaut 3% de la masse du sable. Cela rapproche la quantité d'eau effective dans le mélange, comme rapport E/C, à 0,6.

La Figure III.22, présente l'évolution du temps d'écoulement en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du sable concassé calcaire.

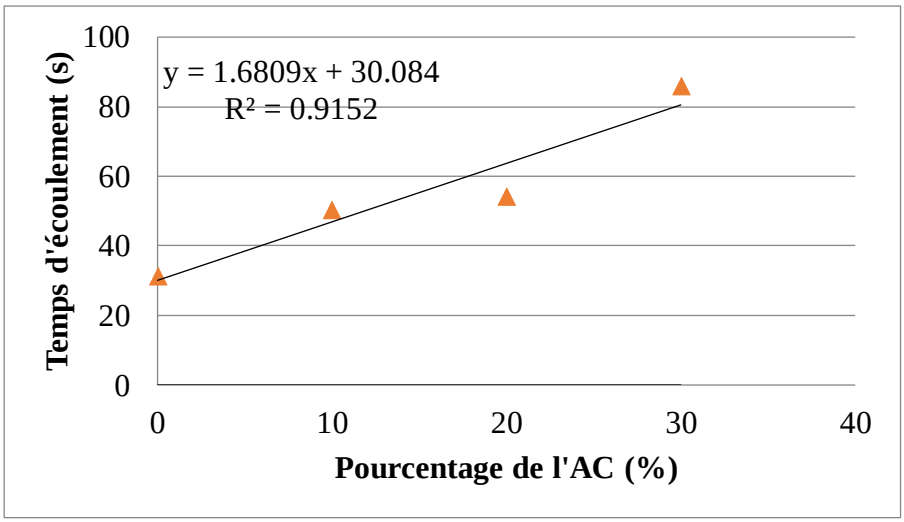


Figure III.22 : Evolution du temps d'écoulement en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du sable concassé calcaire (SC)

Les valeurs du temps d'écoulement obtenues, montrent qu'il y a une augmentation linéaire en fonction du pourcentage de l'AC dans le ciment. L'ouvrabilité a été affectée pratiquement de la même manière qu'avec le SR. Donc, l'effet de la nature cohésive de l'argile calcinée et sa grande finesse par rapport au ciment a eu toujours lieu dans l'aspect du mortier à l'état frais.

Ainsi, on peut constater que la valeur relative au mortier témoin à base du SC est nettement supérieure à celle du témoin à base du SR. Cela est dû à la forme irrégulière et à la chape rugueuse des grains du SC.

III.3.8.2 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.23 montre l'effet de l'augmentation du pourcentage de l'AC dans le ciment sur la résistance à la compression du mortier à base du SC. Contrairement aux résultats obtenus avec du SR, l'influence de l'ajout de l'AC au ciment sur la résistance à la compression semble positif jusqu'à 20% d'AC. Ainsi, même pour 30% d'AC, la résistance à 28 jours obtenue présente 87% de la résistance, du mortier témoin à 100% du ciment pour le même âge. Cette amélioration est attribuée à l'activité pouzzolanique de l'argile calcinée en présence du filler calcaire dans le SC. Ce résultat pourrait être qualifié de très prometteur dans le cadre de valorisation à la fois de l'argile locale et du sable de concassage calcaire provenant des carrières locaux.

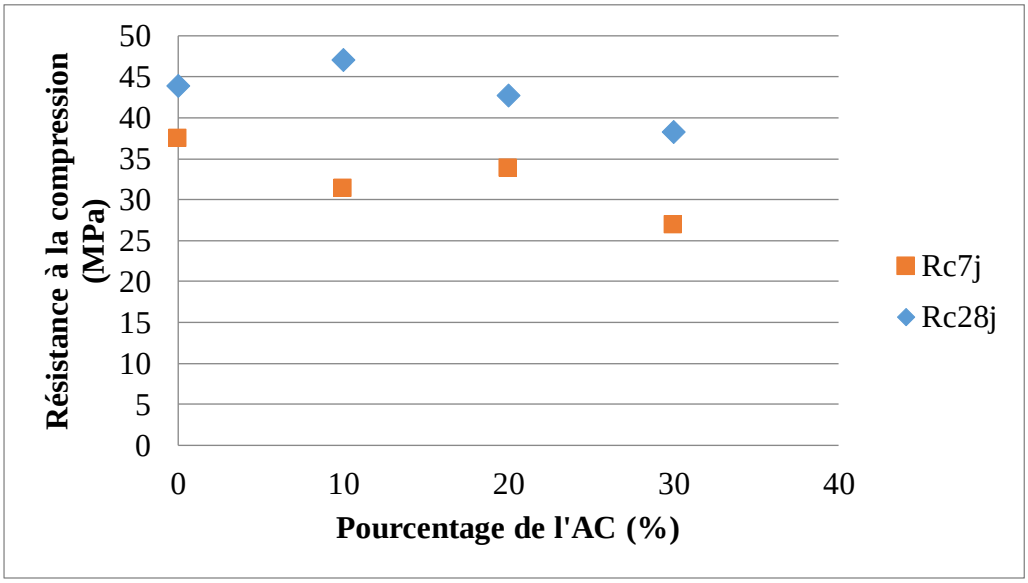


Figure III.23 : Evolution de la résistance relative à la compression en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du SC

Cependant, la résistance à 7 jours, présente une légère baisse à cause du retard provoqué par la diminution de la quantité du clinker, et donc la diminution de l'activité hydraulique du LC3 en faveur de l'activité pouzzolanique.

En revanche, il est clair que la résistance du mortier témoin de cette série est nettement inférieure à celle du témoin de la série III, à base du SR. Pour ce résultat, on doit rappeler que cette série est confectionnée avec un rapport E/C réel est presque égal à 0,6, suite à la quantité d'eau ajoutée afin de compensée le taux d'absorption du SC. Il est à noter qu'on a considéré seulement 75% du taux d'absorption calculé, selon les études effectuées par [Alhozaimy, 2009] et [Touati et al., 2022].

ii) Résistance à la traction par flexion 7 et 28 jours

Les résultats de la résistance à la flexion sont illustrés à la Figure III.24. On peut constater que la substitution du ciment par l'AC améliore légèrement la résistance à 28 jours. En revanche, pour 30% d'AC, on a eu une petite diminution à 7 jours. En effet, avoir une bonne résistance à traction et à la compression en même temps présente une propriété très intéressante, de point de vue technique. Puisque, lorsque la résistance à la compression augmente, le module de rigidité augmente aussi. Ce qui provoque généralement, une diminution de la souplesse de ce matériau. Ce qui conduit à affaiblir la résistance à la traction par flexion.

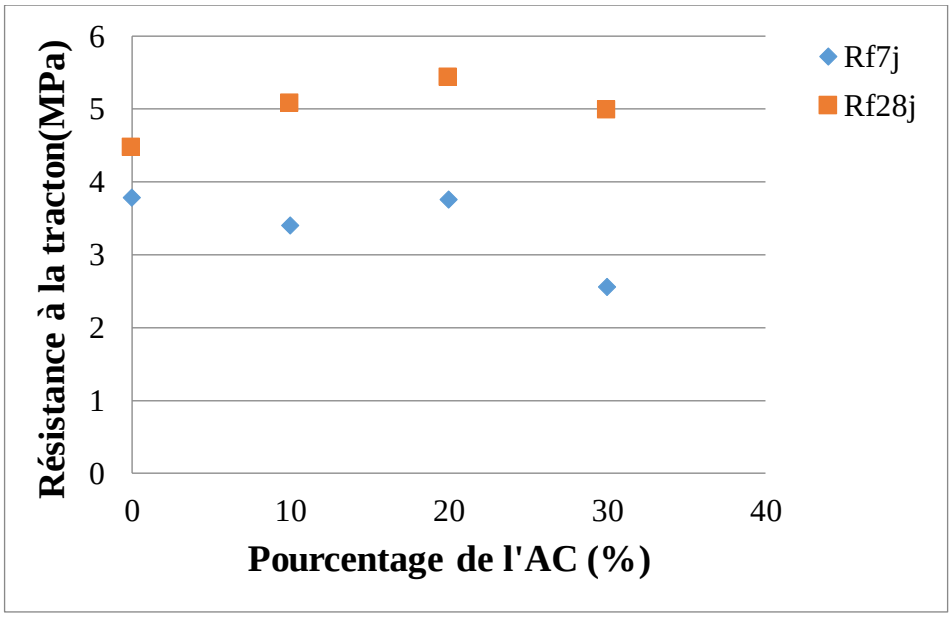


Figure III.24 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la substitution de l'AC par le ciment dans un mortier à base du SC

III.3.9 Effet du superplastifiant (série IX).

III.3.9.1 Etat frai

i) Affaissement au mini cône

La Figure III.25 présente l'évolution de l'affaissement au mini cône du mortier en utilisant deux types du superplastifiant :

- Le premier superplastifiant appelé TEMPO-10 (Sp1), à base de copolymère acrylique ;
- Le deuxième superplastifiant (Sp2) est le Glenium SKY 537, à base d'étherpolycaboxylique modifié.

Pour établir une comparaison entre les différents mortiers étudiés, on a visé un affaissement au mini cône égal à 3,5 cm pour le mortier témoin, en utilisant Sp1 et Sp2. Comme il est montré par la Figure III.26, un dosage de 1% du Sp1 provoque un ressuage du mortier. Par contre, un dosage de 0,6% donne un mortier ferme, avec un affaissement nul.

Probablement, les polymères éther/ester-polycarboxylate (PCE) présentent l'invention la plus importante dans la technologie du béton de ces dernières décennies, selon [Lei et al., 2022]. Ils offrent plusieurs avantages par rapport aux anciennes générations de superplastifiants tels que le polynaphtalène sulfonate (PNS), polymélamine sulfonate (PMS) et polycondensats acétone-formaldéhyde-sulfonate (AFS). Malgré tout ça, les PCE sont cependant très sensibles aux contaminants argileux présents dans les granulats qui peuvent sérieusement altérer leur

efficacité vis-à-vis de la maniabilité du béton frais et également la résistance à la compression du béton durci [Lei et al., 2022].

Expérimentalement, les résultats illustrés sur la Figure III.25, montrent que LC3 affecte l'ouvrabilité du mortier plus fortement avec Sp1 que Sp2. Telle que la perte de l'affaissement était 62% avec Sp2 et 28% avec Sp1.

En revanche, il est clair que le mortier à base du SC demande un dosage en Sp plus grand. Ceci confirme les résultats ainsi obtenus sans Sp.

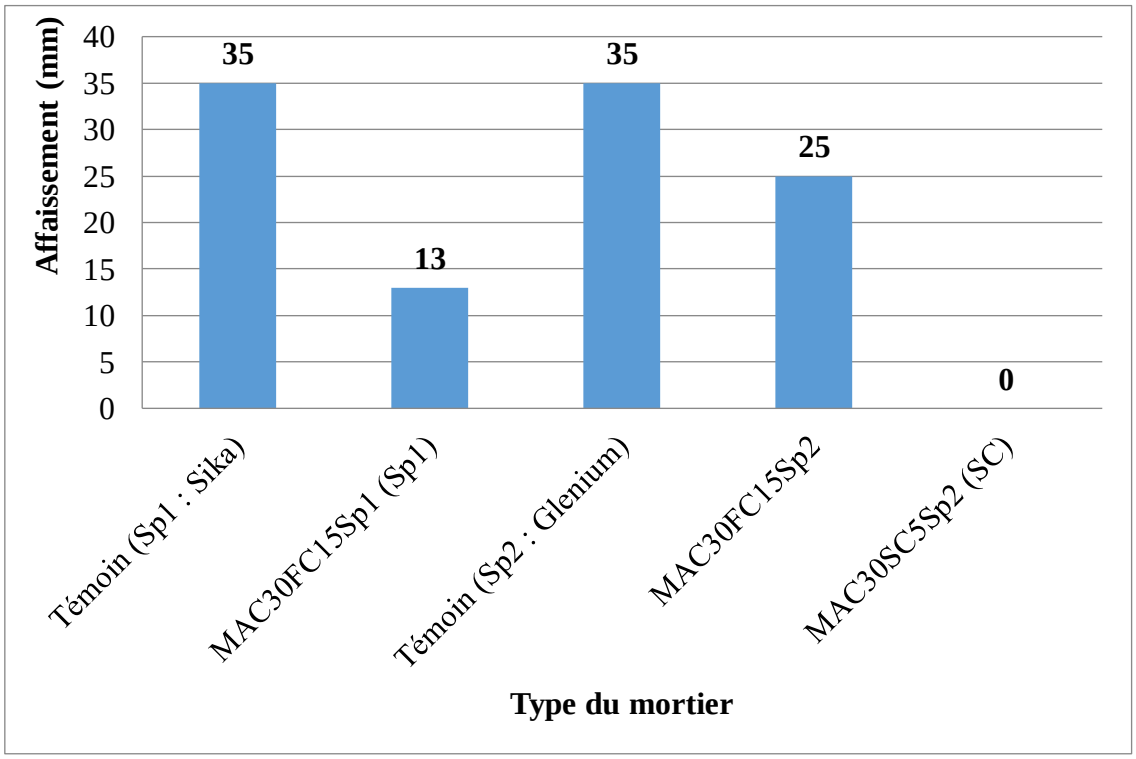


Figure III.25 : Evolution de l'affaissement des mortiers avec superplastifiant



Figure III.26 : Etat du mortier avec a) 1% du Sp1 et b) 0,8% de Sp1

Donc, d'une manière générale, quelque soit le superplastifiant utilisé (Sp1 ou Sp2), le dosage requis pour un mortier à base de LC3, en visant une ouvrabilité constante, est nettement supérieur par rapport au mortier témoin, avec 100% ciment. Cela peut être dû à l'intercalation des molécules du Sp entre les couches d'argile, comme il est rapporté par [Nair et al., 2020]. La demande plus élevée du Sp, peut également être due à une finesse plus élevée de LC3 par rapport au ciment. Ainsi, la surface spécifique du liant est un paramètre important qui influe sur l'adsorption des superplastifiants. Selon [Nair et al., 2020], le point de saturation, en Sp, augmente avec la finesse du matériau cimentaire.

III.3.9.1 Etat durci

i) Résistance à la compression

La Figure III.27 illustre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours du mortier confectionnés avec différents types du Sp. En comparaison avec les résultats obtenus sans Sp (Figures III.2 et III.23), on remarque qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression à 28 jours.

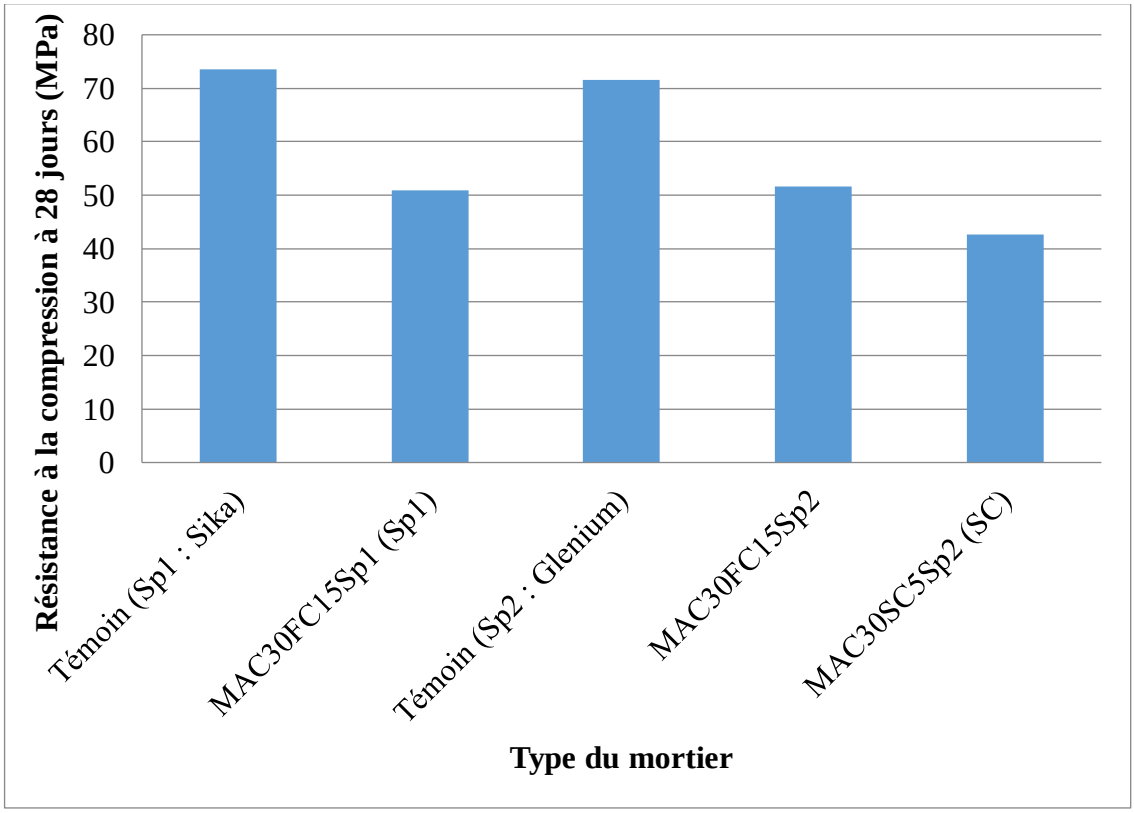


Figure III.27 : Evolution de la résistance à la compression du mortier avec différents types du Sp à 28 jours

Cependant, l'amélioration enregistrée avec les mortiers à base de LC3 est nettement supérieure à celle du mortier témoin, telles que : on a eu une amélioration de presque 30% de la résistance du mortier LC3 à base du SR et 12,5% du mortier LC3 à base de SC. Par contre, les mortiers témoin gagnent seulement 4% lorsqu'on a utilisé un Sp.

ii) Résistance à la traction par flexion et 28 jours

Contrairement à ce qu'on a constaté avec la résistance à la compression, la Figure III.28 montre qu'on a eu une diminution de la résistance à la traction par flexion, et cela pratiquent avec tous les mortiers étudiés. En effet, l'amélioration de la résistance à la compression conduit à une augmentation de la rigidité. Ce qui provoque une chute de la résistance à la traction par flexion.

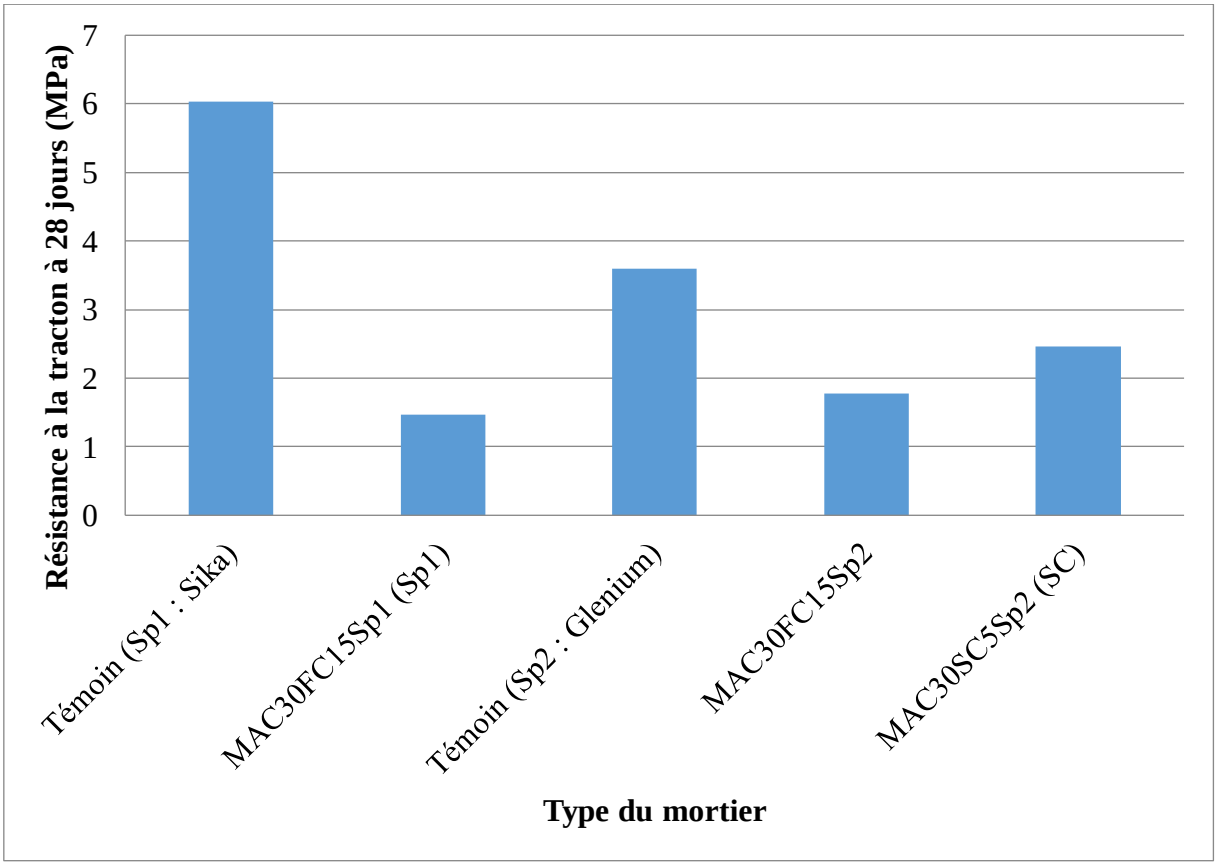


Figure III.28 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du mortier avec différents types du Sp à 28 jours.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail consiste à valoriser l'argile locale, de Médéa, pour son éventuelle utilisation dans le béton comme matériaux cimentaire supplémentaire (MCS). A cet effet, on a procédé à calciner l'argile et l'incorporer dans le ciment avec des pourcentages allant jusqu'à 30% en combinaison avec du filler calcaire, jusqu'à 15%. L'influence de l'argile calcinée (AC) et du filler calcaire (FC) sur l'ouvrabilité du mortier de ciment et sa résistance mécanique à la compression et à la traction en comparaison avec le mortier témoin à base du 100% ciment (OPC) a été identifiée dans ce travail. Les investigations effectuées par cette étude indiquent que :

- L'utilisation de l'argile calcinée bleuâtre (AC1) et de l'argile calcinée jaunâtre (AC2) donne pratiquement la même résistance mécanique. Par contre, la perte d'ouvrabilité avec l'AC2 était plus forte qu'avec l'AC1.
- Le filler calcaire gris (FCG), provenant du sable de concassage calcaire gris, donne une résistance à 7 et à 28 jours plus grande que le filler calcaire blanc (FCB), broyé à partir d'un gravier 3/8 blanc. Par contre, l'ouvrabilité était meilleure avec l'utilisation du FCB.
- L'application de la combinaison de référence pour le LC3 sur notre argile, qui consiste à mélanger 30% d'AC1, 15% du FC et 55 d'OPC, donne une résistance nettement inférieure à 75% de la résistance du témoin (100% d'OPC) à 28 jours : limite exigée par la norme ASTM C618 pour que le matériau cimentaire supplémentaire (MCS) soit acceptable.
- La variation de l'AC1 de 0 à 30%, avec pas de 10%, en combinaison avec du FCG entre 0 et 15 %, pas de 5%, indique que la meilleure résistance est obtenue avec la combinaison de 10% d'AC1 et 10% du FCG. Cependant, un pourcentage du 30% d'AC1 et 10% du FCG peut être considéré comme satisfaisant pour notre argile, du point de vue technique, économique et environnemental, en offrant une résistance supérieure à 75% de la résistance du mortier témoin à 100% d'OPC.

- L'étude de l'effet de la température de calcination montre que la température de calcination optimale pour notre argile est 800°C pendant 3 heures.
- La substitution de 10% du ciment par l'AC1, a amélioré la résistance mécanique du mortier à base du sable de concassage calcaire. Cependant, 30% d'AC1 dans le ciment a provoqué une résistance dépassant 85% de la résistance du témoin (100% d'OPC).
- L'utilisation du superplastifiant (Sp) à base d'étherpolycaboxylique a donné une meilleure ouvrabilité par rapport au Sp à base de copolymère acrylique pour un dosage qui donne une ouvrabilité constante du mortier témoin, avec 100% d'OPC.

Finalement, comme pour tous les nouveaux matériaux, des recherches supplémentaires sont également nécessaires pour vérifier les performances long terme et étudier la durabilité à l'échelle mortier et surtout béton.

Ainsi, il est très intéressant de continuer ce travail et confirmer les résultats obtenus, en utilisant une argile calcinée à 800°C pendant 3 heures, au lieu de 5 heures adoptée dans ce travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Alhozaimy , 2009] : ALHOZAIMY, Abdulrahman M. Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2009, vol. 31, no 7, p. 470-473.

[Al-Noaimat et al., 2023] : AL-NOAIMAT, Yazeed A., CHOUGAN, Mehdi, AL-KHEETAN, Mazen J., et al. 3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry. Results in Engineering, 2023, p. 101115.

[Antoni et al., 2012] : ANTONI, Mathieu, ROSSEN, J., MARTIRENA, F., et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and concrete research, 2012, vol. 42, no 12, p. 1579-1589.

[Antoni, 2013] : ANTONI, Mathieu. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone. EPFL, 2013.

[ASTM C 618] : ASTM C 618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards; 1993.

[Avet et et al., 2016] : AVET, François, SNELLINGS, Ruben, DIAZ, Adrian Alujas, et al. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. Cement and Concrete Research, 2016, vol. 85, p. 1-11.

[Avet et Scrivener, 2018] : AVET, François et SCRIVENER, Karen. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). Cement and Concrete Research, 2018, vol. 107, p. 124-135.

[Berriel et al., 2016] : BERRIEL, S. Sánchez, FAVIER, Aurélie, DOMÍNGUEZ, E. Rosa, et al. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. Journal of cleaner Production, 2016, vol. 124, p. 361-369.

[Bullerjahn et al., 2020] : BULLERJAHN, F., ZAJAC, M., PEKARKOVA, J., et al. Novel SCM produced by the co-calcination of aluminosilicates with dolomite. Cement and Concrete Research, 2020, vol. 134, p. 106083.

[Cassagnabère et al., 2013] : F. Cassagnabère, P. Diederich, M. Mouret, G. Escadeillas, M. Lachemi, Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state, Cem. Concr. Compos. 37 (2013) 95–107.

[Danner et al., 2013] DANNER, Tobias, ØSTNOR, Tone, et JUSTNES, Harald. Thermally activated marl as a pozzolan for cementitious based products. In : Proceedings of the Twin Covilha International Conferences on Civil Engineering—Towards a Better Environment and the Concrete Future, Covilha, Portugal. 2013. p. 26-29.

[Danner et al., 2020] : DANNER, Tobias, NORDEN, Geir, et JUSTNES, Harald. The effect of calcite in the raw clay on the pozzolanic activity of calcined illite and smectite. In : Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Springer Singapore, 2020. p. 131-138.

[Danner et al., 2021] : DANNER, Tobias, NORDEN, Geir, et JUSTNES, Harald. Calcareous smectite clay as a pozzolanic alternative to kaolin. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, vol. 25, no 9, p. 1647-1664.

[De Weerdt et al., 2008] : DE WEERDT, K. et JUSTNES, H. Microstructure of binder from the pozzolanic reaction between lime and siliceous fly ash, and the effect of limestone addition. In : Proceedings of 1st Int. Conf. on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. 2008. p. 13-15.

[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.
[Dron, 1978] : DRON, R. L'activité pouzzolanique. BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSS, 1978, no 93.
[EN196-1] : Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength, European Committee for Standardization, 2006.
[Fernandez et al., 2011] : FERNANDEZ, Rodrigo, MARTIRENA, Fernando, et SCRIVENER, Karen L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement and concrete research, 2011, vol. 41, no 1, p. 113-122.
[Ferreiro et al., 2017] : FERREIRO, S., HERFORT, D., et DAMTOFT, J. S. Effect of raw clay type, fineness, water-to-cement ratio and fly ash addition on workability and strength performance of calcined clay–limestone Portland cements. Cement and Concrete Research, 2017, vol. 101, p. 1-12.
[Gnisci, 2022] : GNISCI, Andrea. Preliminary characterization of hydraulic components of low-temperature calcined marls from the south of Italy. Cement and Concrete Research, 2022, vol. 161, p. 106958.
[Guo et al., 2023] : GUO, Yangyang, LUO, Lei, LIU, Tingting, et al. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. Journal of Environmental Sciences, 2023.
[Habert et al., 2009] : HABERT, Guillaume, CHOUPAY, Nathalie, ESCADEILLAS, Gilles, et al. Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. Applied Clay Science, 2009, vol. 43, no 3-4, p. 322-330.
[Lei et al., 2022] : LEI, Lei, PALACIOS, Marta, PLANK, Johann, et al. Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: A review. Cement and Concrete Research, 2022, vol. 154, p. 106717.
[Malquori, 1960] Malquori G., Portland-Pozzolan Cement, International Symposium on the Chemistry of Cement, 4, Washington, D.C, Paper VIII-3, 2, p983-1006, 1960
[Massazza, 1976] : MASSAZZA, Franco. Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements. Il Cemento, 1976, vol. 1, p. 3-38.
[Mehdizadeh et al., 2021] : MEHDIZADEH, Hamideh, LING, Tung-Chai, CHENG, Xiongfei, et al. Effect of particle size and CO2 treatment of waste cement powder on properties of cement paste. Canadian Journal of Civil Engineering, 2021, vol. 48, no 5, p. 522-531.
[Nair et al., 2020] : NAIR, Nithya, HANEEFA, K. Mohammed, SANTHANAM, Manu, et al. A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. Construction and Building Materials, 2020, vol. 254, p. 119326.
[Scrivener et al., 2018] : SCRIVENER, Karen, MARTIRENA, Fernando, BISHNOI, Shashank, et al. Calcined clay limestone cements (LC3). Cement and Concrete Research, 2018, vol. 114, p. 49-56.
[Shah et al., 2020] : SHAH, Vineet, PARASHAR, Anuj, MISHRA, Geetika, et al. Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete. Advances in Cement Research, 2020, vol. 32, no 3, p. 101-111.
[Sharma et al., 2021] : SHARMA, Meenakshi, BISHNOI, Shashank, MARTIRENA, Fernando, et al. Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. Cement and Concrete Research, 2021, vol. 149, p. 106564.
[Site web1] : https://www.cultivar.fr/technique/bien-distinguer-largile-mineralogique-de-largile-granulometrique

[Site web2 : Souchu, 2014] : http://doc.lerm.fr/pouzzolanicite-activite-pouzzolanique-et-hydraulicite/
[Site web3 : wikipedia] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liant_hydraulique.
[Site web4] : https://www.infociments.fr/ciments/la-norme-des-ciments-bas-carbone-la-nf-en-197-5-disponible-des-ocotbre.
[Taouti et al., 2022] : TAOUTI, Farouk, LAREDJ, Hamza El Amine, et SAFIDDINE, Salim. Effet de la méthode d'incorporation des fines calcaires sur l'ouvrabilité et la résistance du mortier de ciment. 2022.
[Taylor-Lange et al., 2015] : TAYLOR-LANGE, Sarah C., LAMON, Emily L., RIDING, Kyle A., et al. Calcined kaolinite–bentonite clay blends as supplementary cementitious materials. Applied Clay Science, 2015, vol. 108, p. 84-93.
[Trezza et al., 2018] TREZZA, M. A., TIRONI, A., et IRASSAR, E. F. Thermal activation of two complex clays (kaolinite-pyrophillite-illite) from tandilia system, Buenos Aires, Argentina. In : Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Springer Netherlands, 2018. p. 469-474.
[Wang et al., 2018] 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.
[Yu et al,. 2021] : YU, Jing, WU, Hao-Liang, MISHRA, Dhanada K., et al. Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2). Journal of Cleaner Production, 2021, vol. 278, p. 123616.
[Zhou et al., 2017] ZHOU, Ding, WANG, Richard, TYRER, Mark, et al. Sustainable infrastructure development through use of calcined excavated waste clay as a supplementary cementitious material. Journal of Cleaner Production, 2017, vol. 168, p. 1180-1192.