

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire De Master

Présenté à l'Université du 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : HARRAT GHANIYA

**THEME : Valorisation du kaolin algérien dans l'industrie
céramique et dans l'élaboration des éco-ciments**

Sous la direction de : Pr. BENMALEK ML

Juin 2025

Dédicace

Avec ma profonde gratitude et mon grand amour, je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, qui m'ont entouré de leur amour et de leur soutien indéfectible, et qui ont toujours cru en moi.

A mes chères frères RAMZI et HAKIM, qui ont été ma source de force et d'encouragement tout au long de mon parcours.

A mon grand-père bien-aimé, symbole de sagesse et de bienveillance, dont les conseils ont toujours été précieux.

A la femme de mon frère RAOUIA, pour son aide et ses encouragements sincères.

A tous mes amis fidèles, avec qui j'ai partagé les joies et les défis

A vous tous, un immense merci d'être toujours là pour moi.

GHANIYA

Remercîments

Avec toute ma gratitude et mon respect, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire :

*Tout d'abord, louange à **dieu** qui m'a donné la force et la persévérance pour mener ce travail à bien. Sans ça volonté, ce projet n'aurait pas été possible.*

*A mon encadreur **Mr Benmalek Med Larbi**, qui a généreusement partagé avec son savoir et ses conseils précieux tout au long de cette aventure, je lui exprime ma reconnaissance profonde et mon estime.*

*Aux **membres du jury**, qui ont accepté d'évaluer mon travail et ont enrichi mon parcours académique par leurs remarques constructives, je vous suis extrêmement reconnaissant.*

*A **mes professeurs et aux employés du département de génie civil**, qui ont contribué à mon apprentissage et m'ont offert leur soutien et leur expertise, je vous adresse mes plus sincère remerciements.*

*Aux **employés du laboratoire LNHC (Laboratoire National d'Habitat et de la Construction)**, qui m'ont facilité l'accès aux ressources et permis de mener mes expériences dans des conditions optimales, je vous témoigne toute ma gratitude.*

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, par un conseil, un soutien ou même un simple encouragement, sachez que votre bienveillance a été précieuse pour moi.

A vous tous un immense merci, et que vos efforts et votre générosité soient récompensés.

HARRAT Ghaniya

RÉSUMÉS

(En trois langues)

Résumé

Dans le présent travail, nous avons d'abord présenté un descriptif global du kaolin : Cette partie, d'ordre bibliographique nous a permis d'exposer sa définition, sa formation, sa place dans le rang des argiles, ses propriétés, sa composition chimique et minéralogique.

Le métakaolin (MK) qui est une variété du kaolin obtenu par traitement thermique à 500 – 900°C a été exposé ainsi que ses applications dans la production de la céramique et en tant que matériau pouzzolanique dans la production des éco-ciments, ainsi que dans les réfractaires.

Quelques gisements connus en Algérie ont été présentés dans ce mémoire qui sont principalement ceux de Djebel Debbagh à Guelma et celui de Tamazert (El Milia wilaya de Jijel).

Des essais expérimentaux ont été réalisés dans le cadre d'une initiation aux travaux de laboratoire. Elles ont porté sur l'étude de l'effet du taux de kaolin sur le début de prise, sur la consistance normale du ciment composé élaboré et sur sa résistance à la compression à 28 jours. Les résultats ont montré un gain de temps dans le début de prise du ciment et une avidité en eau plus grande pour le kaolin. Les résistances à la compression ont été légèrement améliorées avec l'introduction du kaolin.

Nous avons réservé un chapitre pour une étude de cas relativement détaillée sur un mortier à base de kaolin issu d'un gisement local à El Milia, wilaya de Jijel. Il a été prouvé que le MK peut être utilisé pour améliorer la résistance aux acides des mortiers de ciment ainsi que leurs résistances à la compression lorsqu'il est utilisé aux taux de 10 et 20 %.

Par ailleurs, ce travail a été valorisé par la mise au point d'un glossaire comprenant plus de 150 mots liés au présent thème et réalisé en 3 langues (français-anglais-arabe). Le but est une contribution pour enrichir la bibliographie du thème, notamment en langue anglaise dont l'usage a un avenir prometteur dans les universités algériennes.

MOTS CLÉS : Kaolin – Métakaolin – Ciment composé – Substitution – Caractéristiques – Kaolin algérien.

ملخص

في هذا العمل قدمنا إبتدائيا وصفاً شاملاً للكاولين: هذا الجزء من العمل ذو الطبيعة الببليوغرافية سمح لنا بتقديم تعريفه، وتكوينه، ومكانته في صفوف الطين، وخصائصه، وتركيبه الكيميائي والمعدني.

ثمّ تمّ تقديم الميتاكاولين وهو نوع من الكاولين يتم الحصول عليه عن طريق المعالجة الحرارية عند درجة حرارة تتراوح بين 500 و 900 درجة مئوية إلى جانب تطبيقاته في إنتاج السيراميك وكمادة بوزولانية في إنتاج الأسمنت البيئي وكذلك في المواد الحرارية.

تم عرض عدد من الرواسب المعروفة في الجزائر في هذا التقرير، خاصةً تلك الموجودة في جبل دباغ في قالمة وتمازيرت (الميلية ولاية جيجل).

تمّ إجراء الاختبارات التجريبية كجزء من مقدمة العمل المختبري. وقد تمّ التركيز على دراسة تأثير نسبة الكاولين على بداية التصلب، وعلى القوام الطبيعي للأسمنت المركب المحضر وعلى قوته الانضغاطية عند 28 يومًا. وأظهرت النتائج ربحًا في الوقت في بداية ضبط الأسمنت وزيادة رغبة الكاولين في الماء. تمّ تحسين القوة الضاغطة بشكل طفيف مع إدخال الكاولين.

لقد خصصنا فصلًا لدراسة حالة ملاط متكوّن من كاولين محلي من رواسب الميليا، ولاية جيجل. وقد ثبت أنّه يمكن استخدامه لتحسين مقاومة الأحماض لملاط الأسمنت وكذلك قوته الانضغاطية عند استخدامه بمعدلات 10 و 2%.

علاوة على ذلك، تم تعزيز هذا العمل من خلال تطوير مسرد يضم أكثر من 150 كلمة تتعلق بهذا الموضوع وتم إنتاجه بثلاث لغات (الفرنسية - الإنجليزية - العربية). ويهدف هذا العمل إلى المساهمة في إثراء ببليوغرافيا الموضوع، وخاصة باللغة الإنجليزية، التي يعد استخدامها في الجامعات الجزائرية مستقبلا واعدًا.

الكلمات المفتاحية: الكاولين - الميتاكاولين - الأسمنت المركب - الاستبدال - الخصائص - الكاولين الجزائري.

Abstract

In the present work, we have presented at first of all an overall description of kaolin: this bibliographical section has enabled us to explain its definition, its formation, its place in the class of clays, its properties and its chemical and mineralogical composition.

Metakaolin (MK), a variety of kaolin obtained by heat treatment at 500-900°C, and its applications in the production of ceramics and as a pozzolanic material in the production of eco-cement and refractories were described.

A few known deposits in Algeria were presented in this thesis, mainly those at Djebel Debbagh in Guelma and Tamazert (El Milia wilaya de Jijel).

Experimental tests were carried out as part of an introduction to laboratory work. They focused on studying the effect of the kaolin content on the start of setting, on the normal consistency of the composite cement produced and on its compressive strength at 28 days. The results showed a time saving in the onset of cement setting and greater water avidity for kaolin. Compressive strengths were slightly improved with the introduction of kaolin.

We have reserved a chapter for a relatively detailed case study of a kaolin-based mortar from a local deposit at El Milia, wilaya of Jijel. It was shown that MK can be used to improve the acid resistance of cement mortars as well as their compressive strengths when used at rates of 10 and 20%.

In addition, this work has been enhanced by the development of a glossary containing more than 150 words related to this theme and produced in 3 languages (French-English-Arabic). The aim is to contribute to the bibliography of the theme, particularly in English, which has a promising future in Algerian universities.

KEYWORDS: Kaolin - Metakaolin - Compound cement - Substitution - Characteristics - Algerian kaolin.

SOMMAIRE

CHAPITRE I GENERALITES SUR LE KAOLIN.....	2
I.1. APERÇU SUR LES ARGILES.....	3
I.2. LE KAOLIN.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Formation du kaolin.....	4
I.2.2.a. Les kaolins primaires ou résiduels	4
I.2.2.b. Les kaolins secondaires ou sédimentaires	4
I.2.3. Structure de la kaolinite.....	5
I.2.4. Propriétés de la kaolinite.....	5
I.2.4.a. Propriétés physico-chimiques de la kaolinite.....	5
I.2.4.b. Propriétés thermiques.....	6
I.2.4.c. Autres propriétés	6
I.2.5. Les principaux usages du kaolin.....	6
I.2.5.a. Dans les émaux.....	6
I.2.5.b. Dans les matériaux de construction.....	7
I.2.5.c. Papiers.....	7
I.2.5.d. Les applications médicales et cosmétiques	7
I.2.5.e. Fibres de verre	7
I.2.4.f. Peintures	7
I.2.4.g. Polymères	7
I.2.4.h. Production d'Alumine.....	8
I.2.4.i. Répulsif d'insectes	8
I.3. LE METAKAOLIN.....	8
I.3.1. Définition.....	8
I.3.2. Composition chimique et minéralogique.....	8
I.3.2.a. La composition chimique	8
I.3.2.b. La composition minéralogique.....	8
I.3.3. Utilisation du métakaolin	9
I.4. LES GISEMENTS DE KAOLIN EN ALGERIE.....	9
I.4.1. Localisation du kaolin de Djebel Debbagh.....	9
I.4.2. Caractérisation du kaolin DD ₃	11
I.4.2.a. Composition chimique	11
I.4.2.b. Composition minéralogique.....	11
I.5. KAOLIN DE TAMAZERT (EL-MILIA WILAYA DE JIJEL).....	13
I.5.1. Situation géographique.....	13
I.5.2. Composition minéralogique.....	13

CHAPITRE II LE KAOLIN DANS LES CERAMIQUES ET DANS LES ECO-CIMENTS COMPOSÉS	14
II.1. LE KAOLIN DANS LES CERAMIQUES	15
II.1.1. Les céramiques	15
Elles sont classées en trois catégories :.....	15
1) Les céramiques traditionnelles	15
2) Les céramiques techniques.....	16
3) Les céramiques naturelles	16
II.1.2 Les emplois du kaolin dans les céramiques.....	17
II.1.1.a. Les porcelaines.....	18
II.1.1.b. Les éviers	18
II.1.2. Le kaolin dans la construction	19
II.1.2.a. Les briques émaillés.....	19
II.1.2.b. Les carrelages.....	19
II.1.2.c. Les tuiles	20
II.2. LE KAOLIN DANS LES CIMENTS ECOLOGIQUES	20
II.3. LE KAOLIN DANS LA FABRICATION DU CIMENT BLANC.....	21
CHAPITRE III ETUDE DE CAS.....	22
III.1. INTRODUCTION.....	23
III.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	23
III.2.1. Matériaux utilisés	23
III.2.2. Mélanges étudiés	23
III.2.3. Préparation des échantillons, cure et essais.....	24
III.2.3.a. Résistance à la compression	24
III.2.3.b. Chaleur d'hydratation.....	24
III.2.3.c. Résistance aux attaques acides	25
III.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	25
III.3.1. Chaleur d'hydratation	25
III.3.2. Résistance à la compression	25
III.3.3. Durabilité.....	26
III.4. CONCLUSIONS.....	27
NOS COMMENTAIRES SUR CETTE ETUDE DE CAS	28
CHAPITRE IV PARTIE EXPÉRIMENTALE	29
IV.1. INTRODUCTION.....	30
IV.2. MATERIAUX UTILISES.....	30
IV.2.1. Ciment.....	30
IV.2.2. Kaolin.....	32
IV.2.3. Sable	32
IV.2.4. Eau de gâchage.....	32
IV.3. METHODES D'ESSAIS.....	33

IV.3.1. Granulométrie du sable.....	33
IV.3.2. Masse volumique apparente (Mv) et masse volumique absolue (Ms).....	33
IV.3.3. Consistance normale du ciment.....	34
IV.3.4. Prise du ciment.....	34
IV.3.5. Essais mécaniques sur mortier.....	35
a) Essai de flexion simple.....	35
b) Essai de compression.....	35
IV.4. RESULTATS ET ANALYSE.....	36
IV.4.1. Granulométrie du sable.....	36
IV.4.2. Masse volumique apparente (Mv) du sable.....	36
IV.4.3. Masse volumique spécifique (Ms) du sable.....	37
IV.4.4. Effet du taux de kaolin sur la consistance normale du ciment élaboré.....	37
IV.4.5. Effet du taux de kaolin sur le début de prise du ciment élaboré.....	38
IV.4.6. Effet du taux de kaolin sur les résistances mécaniques du ciment élaboré.....	39
CONCLUSION.....	42
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES D'AVENIR	43

LISTE DES PHOTOS

Photo I.1. Échantillon de kaolin à l'état naturel.....	4
Photo I.2. Les émaux.....	6
Photo I.3. Photo MEB du Kaolin DD3	12
Photo II.1. Quelques exemples de céramiques techniques.....	16
Photo II.2. Assiettes en porcelaine.....	18
Photo II.3. Évier en kaolin	18
Photo II.4. Brique blanche en terre cuite émaillée	19
Photo II.5. Carrelage (Dalle de sol) en kaolin	19
Photo II.6. Tuile blanche contenant du kaolin pour absorber moins de chaleur, et maintenir une température intérieure plus fraîche en été.....	20
Photo IV.7. Eprouvette de mortier avec 15% de kaolin sous la presse hydraulique.....	31
Photo IV.1. Ciment utilisé	32
Photo IV.2. Kaolin en poudre utilisé	33
Photo IV.3. Tamiseuse électrique utilisée.....	33
Photo IV.4. Balance électronique utilisée.....	35
Photo IV.5. Essai de flexion 3 points sur éprouvette 4 x 4 x 16 cm ³	35
Photo IV.6. Essai de compression sur éprouvette 4 x 4 x 4 cm ³	38
Photo IV.7. Eprouvette de mortier avec 15% de kaolin sous la presse hydraulique.....	40
Photo IV.8. Tableau d'affichage de l'appareil d'essai. Vitesse de chargement adoptée = 0.25 KN/s	41

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Coupe schématique d'un gisement de kaolin primaire (Bich, 1989).....	4
Figure I.2. Exemple d'un dépôt de kaolin sédimentaire (<i>Boukoffa, 2008</i>).....	5
Figure I.3. Disposition des feuillets dans des grains argileux (<i>Bouyoucef, 2003</i>)	5
Figure I.4. Location géologique du kaolin de Djebel Debbagh	10
Figure I.5. Analyse minéralogique par DRX du kaolin DD3.....	12

Figure I.6. Situation géographique du gisement (extrait de la carte géographique de Constantine au 1/500 000).....	13
Figure IV.1. Moule pour mesure de Mv	33
Figure IV.2. Schéma de mesure de Ms	33
Figure IV.3. Appareil de Vicat avec sonde.....	34
Figure IV.4. Aiguille de Vicat.....	34
Figure IV.5. Courbe granulométrique du sable utilisé.	36
Figure IV.6. Effet du taux de kaolin sur la quantité d'eau de gâchage pour une consistance normale	38
Figure IV.7. Effet du taux de kaolin sur le début de prise.....	39
Figure IV.8. Variation de Rc28 avec le taux de kaolin.....	40

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I.1. Composition chimique de métakaolins tirés de la littérature.....	8
Tableau I.2. Composition chimique du kaolin DD3.....	11
Tableau II.1. Types de céramiques traditionnelles et leurs modes d'emplois.....	15
Tableau II.2. Produits céramiques à pâtes poreuses	17
Tableau II.3. Céramiques à pâtes imperméables.....	17
Tableau II.4. Composition et propriétés du Kaolin utilisé en céramique	18
Tableau IV.1. Analyse chimique	31
Tableau IV.2. Propriétés physiques	31
Tableau IV.3. Temps de prise.....	31
Tableau IV.4. Résistance à la compression à 2 et 28 jours d'âge.....	31
Tableau IV.6. Masse volumique apparente	36
Tableau IV.7. Masse spécifique	36
Tableau IV.8. Substitution massique du ciment par du kaolin.....	37
Tableau IV.9. Taux de kaolin et début de prise.....	37
Tableau IV.9. Taux de kaolin et début de prise.....	39
Tableau IV.10. Résultats chiffrés	40

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Le kaolin ou argile blanche est présent en abondance dans beaucoup de régions dans le monde. Il est utilisé notamment :

- En céramique pour la fabrication de porcelaine, d'objets décoratifs, de produits sanitaires, dans la fabrication de carreaux de revêtement (faïence, dalle de sol, plinthe), de vaisselle ménagère etc ..., en raison de sa blancheur éclatante et de sa faible teneur en impuretés.
- En construction pour ses propriétés physiques et chimiques spécifiques, notamment sa plasticité, sa résistance à la chaleur et son pouvoir isolant. Il est utilisé dans la fabrication de briques, de tuiles, de mortiers, d'enduits, de produits réfractaires.
- Comme additif dans le béton pour améliorer ses performances. Il constitue une alternative écologique pour la fabrication des ciments à faible impact environnemental. Il est, en effet substitué, sous forme de poudre au clinker de ciment,

L'objectif de ce travail, d'ordre bibliographique et expérimental, est d'abord de faire connaître ses caractéristiques physiques, sa morphologie, sa constitution, sa place dans la classe des argiles et ses multiples applications.

Il s'agira ensuite, dans le cadre d'une initiation à la recherche expérimentale, de mener quelques essais sur un kaolin commercial en poudre pour connaître certains de ses apports dans un ciment composé tels que consistance normale, début de prise et résistance mécanique.

Le présent travail est structuré en 4 chapitres :

- Le chapitre 1 présente des rappels sur le kaolin, sa composition chimique et minéralogique, sa morphologie et sur les différents gisements existant dans le monde et en Algérie.
- Le chapitre 2 est consacré à ses utilisations multiples dans divers domaines, notamment celui de la construction qui nous intéresse le plus dans ce mémoire.
- Dans le chapitre 3, nous exposons un cas d'étude sur la substitution d'un ciment algérien de classe 55 par un kaolin algérien d'un gisement situé à El Milia dans la wilaya de Jijel et sur les propriétés d'un mortier dans lequel il a été incorporé.
- Le chapitre 4 présente les résultats et les analyses d'essais réalisés sur un kaolin type Q130S contenant 36% d'alumine (Al_2O_3) et sur les effets de sa substitution dans un ciment algérien de classe 42.5.

Une conclusion générale, des perspectives et des annexes relatives au kaolin, au ciment, à l'étude de cas et à un glossaire sont présentées en fin de mémoire.

Chapitre I

Généralités sur le kaolin

L'argile est l'un des matériaux les plus anciens utilisés par l'humanité. Elle est malléable, transformable, adhésive, fluide, glissante. Un type de minéraux argileux, principalement des alumino-silicates, utilisé dans diverses applications industrielles est le kaolin. En raison de ses propriétés physico-chimiques spécifiques. La calcination de ce matériau entraîne la destruction de sa structure cristalline, laissant place à un matériau amorphe avec un haut degré de réactivité en milieu basique, le métakaolin (Benaïche L., 2020).

I.1. Aperçu sur les argiles

Il n'existe pas une définition universellement acceptée pour l'argile.

- Les géotechniciens et les agronomes considèrent l'argile comme un matériau constitué de grains dont le diamètre est inférieur à 0,2 μm . Elle peut être constituée du quartz, d'oxydes de fer, de carbonates et des minéraux argileux (**Caillère et al. 1982**).
- Pour le minéraliste, l'argile est un ensemble des matériaux appartenant à la famille des phyllosilicates, c'est-à-dire des minéraux en feuillets formés par la juxtaposition des couches de silices et d'hydroxydes (**Lanson & Bouchet 1995**).
- Dans le sens usuel, l'argile est une terre grosse, molle et plastique composée principalement de silice et d'alumine et qui sert à la fabrication des tuiles et la poterie (**Brunet ; 1986 cité par Mountoumnjou O., 2016**).

D'une façon générale l'argile est un matériau naturel constitué principalement de minéraux silicatés hydratés à grains fins, tels que la kaolinite et la montmorillonite, qui sont le résultat de processus d'altération et de décomposition chimique des roches d'origine (**Schreier, Ré. E. 1968**).

I.2. Le kaolin

I.2.1. Définition

Le terme "kaolin", d'origine chinoise, vient de « KAOLING », qui est le nom d'une ville située à proximité de Yao chao-Fu dans la province de Jingdezhen. Cette région est connue pour l'exploitation de cette célèbre matière première de la porcelaine chinoise depuis 210 avant J-C (**Rabehi B., 2013**).

Le kaolin est une argile blanche, douce et plastique, principalement constituée de fines particules en forme de plaquettes. Ce matériau résulte de l'altération des aluminosilicates anhydres présents dans les roches riches en feldspaths, telles que le granite, sous l'effet de la météorisation et des processus hydrothermaux (**Cheknoun R. et al.**).

La photo I.1. suivante présente un échantillon de kaolin à l'état naturel.



Photo I.1. Échantillon de kaolin à l'état naturel.

I.2.2. Formation du kaolin

I.2.2.a. Les kaolins primaires ou résiduels

La majorité des argiles et minéraux argileux résultent de la transformation des silicates primaires ou des roches volcaniques, sous l'effet de processus physiques et chimiques impliquant l'eau présente à la surface de l'écorce terrestre (Figure I.1).

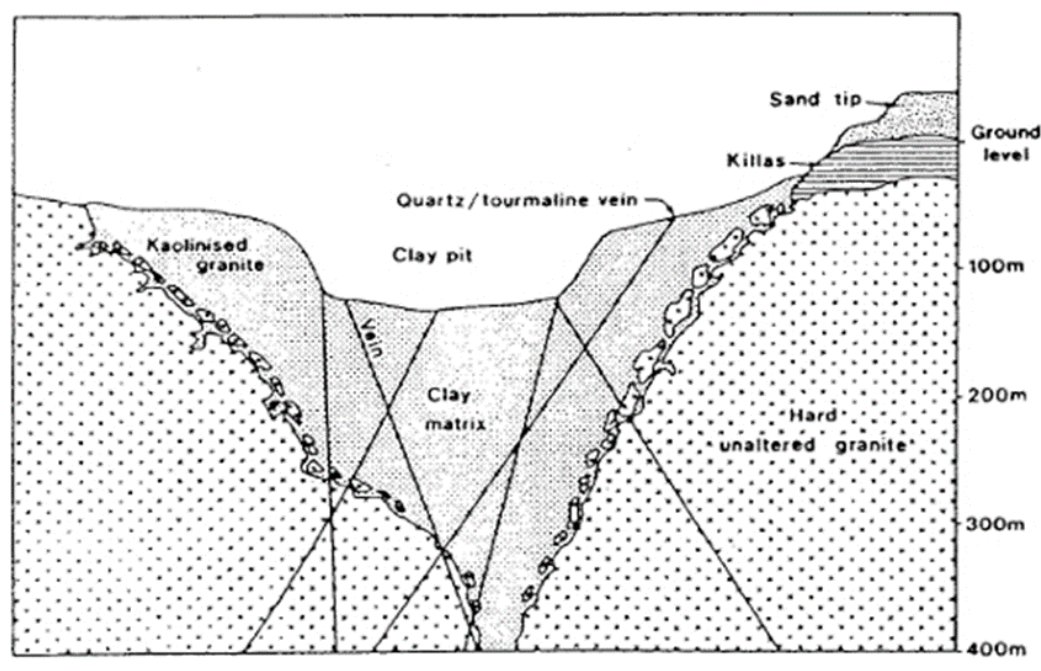


Figure I.1. Coupe schématique d'un gisement de kaolin primaire (Bich, 1989).

I.2.2.b. Les kaolins secondaires ou sédimentaires

Les kaolins primaires peuvent être transportés par les eaux de ruissellement. Une fois mélangés au sable, ils se déposent dans des bassins, formant ainsi des kaolins dits secondaires ou sédimentaires (Figure I.2) (*Cheknoun R. et al.*).

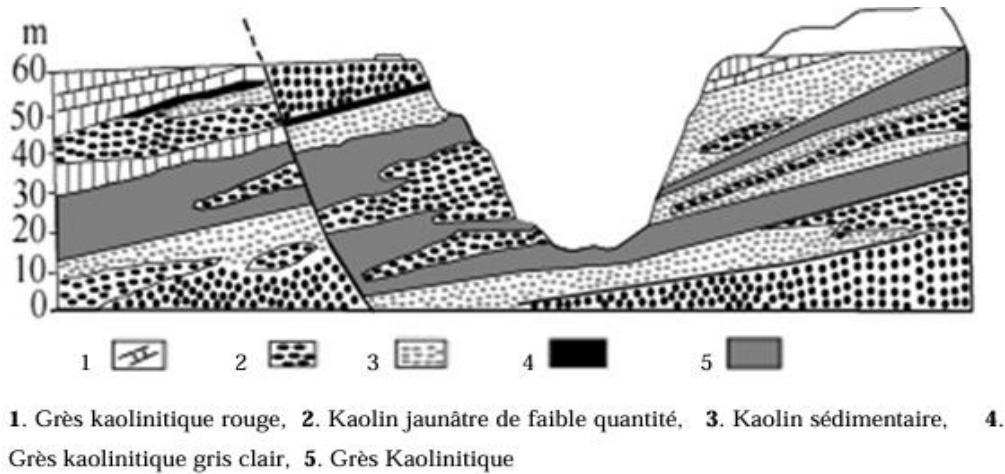


Figure I.2. Exemple d'un dépôt de kaolin sédimentaire (*Boukoffa, 2008*).

I.2.3. Structure de la kaolinite

La kaolinite présente une structure unique en forme de feuillet dans une poudre sèche. Le grain constitue la particule élémentaire de la matière solide et se distingue par son arrangement ordonné de feuillets ou d'agrégats, empilés de manière plus ou moins régulière.

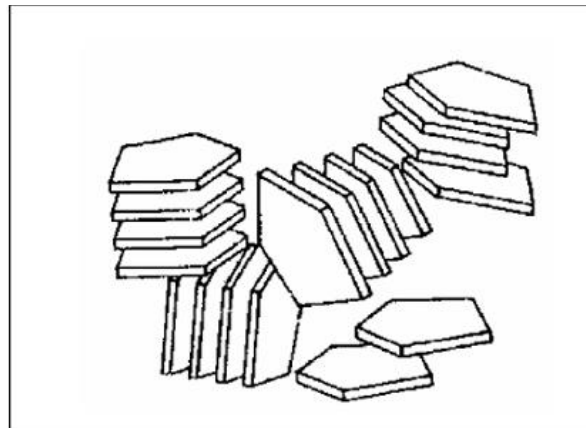


Figure I.3. Disposition des feuillets dans des grains argileux (*Bouyoucef, 2003*)

I.2.4. Propriétés de la kaolinite

I.2.4.a. Propriétés physico-chimiques de la kaolinite

Ces propriétés ont été largement étudiées par (*Cases et al. 1982 et Murray, 1991*). La kaolinite est considérée comme :

- Un minéral non gonflant.
- Faiblement biréfringente, avec un indice de réfraction moyen de 1,56 (*Bundy, 1993*).
- Les cristaux élémentaires se présentent sous forme de plaquettes hexagonales.
- PH neutres ou basiques.
- Chimiquement inerte dans un domaine relativement large de pH (4 à 9).

- Blancheur élevée.
- Bon pouvoir couvrant (utilisation comme pigment).
- Doux et non abrasif.
- Plastique et réfractaire.
- Faible conductibilité thermique et électrique.

I.2.4.b. Propriétés thermiques

- La courbe thermique différentielle du kaolin présente un phénomène endothermique très prononcé à des températures moyennes de 500 à 600 °C et un phénomène exothermique à 950 °C marqué par un crochet aigu (*Boussouf L., 2009*).

I.2.4.c. Autres propriétés

- Dureté 2 à 2.5
- Densité 2.4 à 2.6
- Température de fusion varie entre 1730 à 1785°C.

I.2.5. Les principaux usages du kaolin

Dans les diverses utilisations du kaolin, chaque utilisateur se concentre sur certaines propriétés. Les propriétés souhaitées et les niveaux d'exigence varient d'une industrie à une autre.

En raison de sa couleur naturelle blanche, de ses particules extrêmement fines, de sa souplesse en présence d'eau, de ses propriétés de résistance à la chaleur, de sa faible conductivité thermique et électrique, de sa capacité à se disperser facilement dans l'eau, ainsi que de son coût modéré, le kaolin a de nombreuses utilisations (*Bundy, 1993 et Murray, 1999*).

I.2.5.a. Dans les émaux

Le kaolin joue un rôle essentiel dans les émaux. Il peut remplacer l'apport en alumine et en silice lorsqu'ils sont en quantité insuffisante. Grâce à la finesse et à la forme de ses grains ($< 2 \mu\text{m}$), il contribue significativement à la suspension des barbotines d'émail (Photo I.2).



Photo I.2. Les émaux.

I.2.5.b. Dans les matériaux de construction

Le kaolin est utilisé dans l'industrie du bâtiment et dans la production de ciment (*Gillott, 1987*). Lorsqu'ils sont calcinés à basse température, les kaolins, appelés métakaolins, présentent de très hautes propriétés pouzzolaniques, ce qui en fait d'excellents additifs pour les mortiers et bétons à base de ciment Portland. En tant que source d'alumine, le kaolin peut remplacer les argiles communes riches en fer et éviter la présence de fer dans la production de ciment blanc. Les métakaolins sont particulièrement prisés par les utilisateurs de ciments blancs ainsi que par les fabricants de mortiers et bétons techniques.

I.2.5.c. Papiers

L'industrie papetière est le principal utilisateur de kaolin, l'employant comme matériau de remplissage (charge) dans les feuilles de papier et comme couchage en surface.

I.2.5.d. Les applications médicales et cosmétiques

Le kaolin est utilisé depuis longtemps dans des applications médicales et cosmétiques. Ces marchés requièrent des niveaux de pureté très élevés.

L'utilisation principale du kaolin dans les produits de beauté est le fond de teint. Les fonds de teint sont un mélange de poudre teintée et parfumée utilisé pour améliorer l'apparence de la peau. La proportion de kaolin dans un fond de teint peut varier, allant de seulement 3 % dans une poudre libre à 10 % dans une formule compacte ou épaisse.

I.2.5.e. Fibres de verre

Le kaolin joue un rôle crucial dans la fabrication des fibres de verre utilisées comme renfort dans de nombreuses applications. Il améliore non seulement la capacité de renforcement des fibres intégrées dans le matériau, mais aussi l'intégration des fibres dans les produits nécessitant des plastiques renforcés. Parmi ces produits, on retrouve les produits de construction en fibres de verre et des produits en fibres de verre résistants à la corrosion (*Cheknoun R. et Rabia H., 2015*).

I.2.4.f. Peintures

La granulométrie du kaolin influe sur le type de peinture produite. Le kaolin grossier est utilisé pour les peintures mates, tandis que les kaolins fins sont utilisés pour les peintures brillantes.

I.2.4.g. Polymères

L'incorporation du kaolin dans les polymères permet de produire des surfaces plus lisses, d'améliorer la stabilité dimensionnelle et de renforcer la résistance aux agents chimiques. Dans la fabrication du PVC, le kaolin sert d'agent de renforcement en augmentant la durabilité du plastique.

I.2.4.h. Production d'Alumine

Des recherches récentes ont démontré que la kaolinite peut être utilisée comme source d'alumine.

I.2.4.i. Répulsif d'insectes

Les citronniers, les pêchers et les oliviers peuvent être traités avec un mélange de kaolin (2-5%) et d'eau pour les protéger contre certains insectes nuisibles à leurs fruits, que ce soit dans l'agriculture biologique ou l'agriculture conventionnelle. (*Khaouni S., 2022*).

I.3. Le métakaolin

I.3.1. Définition

Les métakaolins sont produits par la calcination de l'argile kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures variant entre 600 et 900 °C. La température de calcination est déterminée par la pureté du kaolin (ou kaolinite) présent dans l'argile utilisée. En général, la durée du traitement thermique est de cinq heures.

I.3.2. Composition chimique et minéralogique

I.3.2.a. La composition chimique

Les oxydes principaux présents dans la composition chimique du métakaolin sont les oxydes de calcium, de silicium, d'aluminium et de fer. Les métakaolins sont principalement composés d'oxyde de silicium (entre 50 et 55 %) et d'oxyde d'aluminium (entre 40 et 45 %).

La composition chimique de certains métakaolins) sont indiqués dans le tableau I.1 qui suit :

Tableau I.1. Composition chimique de métakaolins tirés de la littérature.

Composition	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)
[Khatib et al.,1996a]	52,1	41,0	4,3					
[Poon et al.,2001]	53,2	43,9	0,4	0,02	0,05	0,2		1,7
[Gruber et al.,2001]	52,1	45,3	0,6	0,05		0,2	0,2	1,6
[Staquet et al.,2004]	55,0	40,0	0,6	<0,1		1,6		
[Batis et al.,2005]	65,9*	22,6	0,9	0,4	0,02			
	47,8	38,2	1,3	0,03	0,04			

I.3.2.b. La composition minéralogique

La composition minéralogique des métakaolins est influencée par la composition chimique de la roche mère du matériau.

Les oxydes se répartissent dans les phases ci-dessous :

- Entre 65 et 85 % de métakaolinite sans hydroxyle résiduel ;
- Entre 5 et 25 % de muscovite totalement des hydroxylée ;
- Entre 7 et 13 % de quartz (SiO). (**Benaïche L., 2020**)

I.3.3. Utilisation du métakaolin

Le Métakaolin est une pouzzolane de synthèse et sa première utilisation, antérieure à 1962, concerne le béton de barrage de Jupia Dam au Brésil.

L'utilisation de matériaux à propriétés pouzzolaniques, tels que le métakaolin, en remplacement d'une partie du ciment Portland dans les mortiers et bétons, peut être envisagée. Ces pouzzolanes réagissent avec la Portlandite pour produire des hydrates similaires à ceux du ciment (Norme ASTM 618-71 American Society for Testing Material).

Une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui n'a que peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) à température et pression ordinaires pour former un liant.

Les pouzzolanes sont réparties en deux catégories : naturelles et synthétiques.

Les pouzzolanes naturelles sont principalement issues des roches volcaniques où le composant amorphe est le verre formé lors du refroidissement suivant la fusion.

Les pouzzolanes synthétiques les plus fréquemment employées incluent les cendres volantes des centrales thermiques, les fumées de silice, la bauxite calcinée, les cendres de balles de riz et les latérites calcinées. Des recherches menées par (**Ambroise J., 1984**) ont démontré que les argiles calcinées constituent des pouzzolanes de synthèse réactives.

I.4. Les gisements de kaolin en Algérie

Les principales régions algériennes productrices de kaolin sont :

- Kaolin de Djebel Debbagh (wilaya de Guelma).
- Kaolin de Tamazert (El-Milia wilaya de Jijel).

I.4.1. Localisation du kaolin de Djebel Debbagh

Le kaolin de Djebel Debbagh (Guelma), également connu sous le nom de kaolin DD, est un kaolin naturel exploité depuis près d'un siècle. Il est extrait d'un gisement situé à Djebel Debbagh, dans la

wilaya de Guelma en Algérie. Ce gisement, de nature hydrothermale, se trouve à proximité de sources thermales réputées.

Le gisement de Djebel Debbagh couvre une superficie de 391 km² et se situe à 17 km de la ville de Hammam Debbagh. Les villes de Guelma et Annaba se trouvent respectivement à 35 km au sud-est et à 90 km au nord-est (Figure I.4).

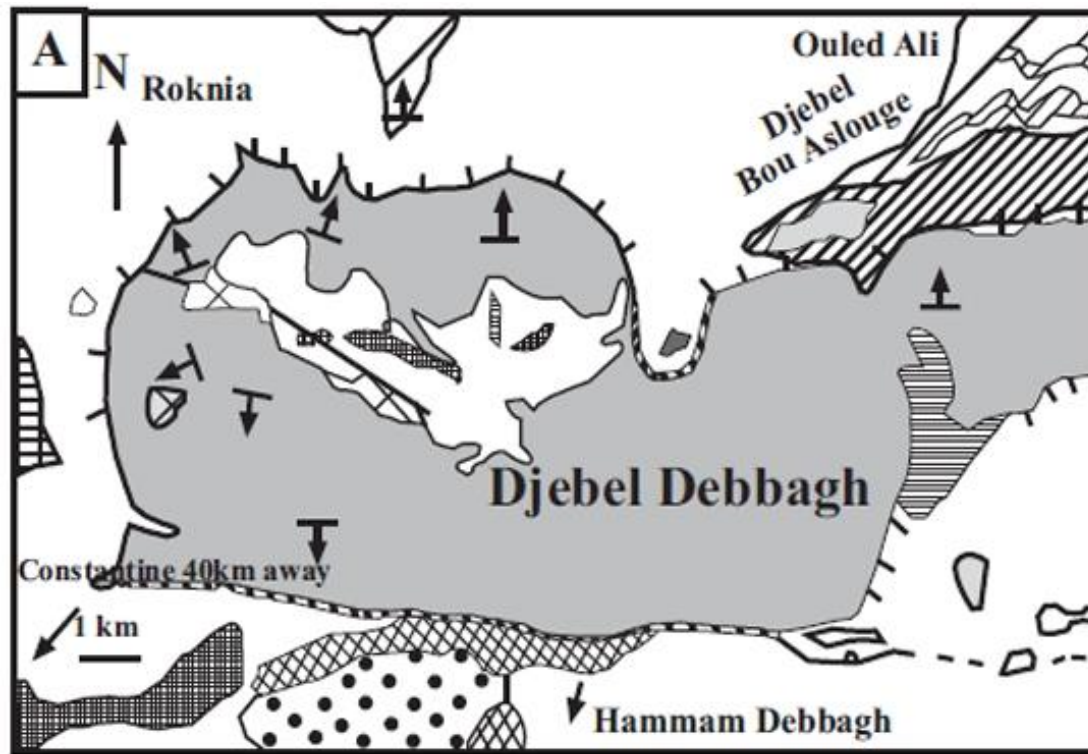


Figure I.4. Location géologique du kaolin de Djebel Debbagh

Elle est caractérisée par des paysages montagneux, qui couvrent environ 60% de la région. Les gisements de kaolin de Djebel Debbagh, situés dans des cavités (karst), sont très riches en alumine entre 36 et 40%. Cependant, ils présentent un taux élevé en oxyde de manganèse (MnO), qui varie de 0,56 à 3%. Cette composition donne une teinte grise à plus de 80% des réserves de kaolin du gisement.

La qualité du kaolin de Djebel Debbagh (DD) varie considérablement selon les filons d'extraction. Certains filons produisent un kaolin pur avec une concentration d'impuretés d'oxydes métalliques inférieure à 1% en poids, et parfois même inférieure à 0,5% en poids (kaolin DD de première nuance). Ce type de kaolin possède une apparence très blanche. Les grains ont une taille inférieure à 2µm, ce qui en fait un produit de haute qualité.

Cependant, certains filons produisent des kaolins de puretés variables, avec des concentrations d'impuretés allant de 2 à 5% selon la catégorie.

Généralement, les diverses qualités du kaolin DD sont classifiées en trois catégories ou nuances, en fonction de la concentration des impuretés d'oxydes métalliques. Les trois types d'argiles, DD₁, DD₂ et DD₃, se distinguent par leurs couleurs : blanches grisâtres pour les argiles DD₁ et DD₂, et grises pour DD₃. Le kaolin DD est constitué de deux phases : la kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'halloysite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Les trois types d'argiles présentent des teneurs en Al_2O_3 et SiO_2 presque similaires, avec des rapports massiques $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ de 0,863, 0,847 et 0,817 pour DD₁, DD₂ et DD₃, respectivement. Ces rapports sont très proches de celui de la kaolinite (0,85). Il est également important de noter que l'argile DD₃ contient des quantités faibles mais non négligeables de Fe_2O_3 , K_2O , CaO et MnO . (*Rabehi B., 2013*)

I.4.2. Caractérisation du kaolin DD₃

Le kaolin DD₃ se présente sous forme de blocs friables composés de kaolin blanc et de kaolins de teinte grisâtre. Le kaolin DD₃ a une densité (tassée) de 1,70 g/cm³.

I.4.2.a. Composition chimique

L'analyse chimique du kaolin DD₃, réalisée sur une poudre fine par fluorescence X, révèle les principaux éléments chimiques le composant, présentés dans le tableau (I.6.). Les résultats montrent que ce kaolin est particulièrement riche en alumine (36,85 %), une proportion de silice de (43.60%), tandis que le fer est presque absent. Enfin, la perte au feu est significative (17 %), principalement due à l'eau contenue dans les minéraux comme la kaolinite, la gibbsite et la todorokite (*Rabehi B., 2013*).

Tableau I.2. Composition chimique du kaolin DD₃.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	SO ₃	CaO	F ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MgO	PAF	Total
43.60	36.85	1.34	0.45	0.20	0.12	0.12	0.11	0.02	0.07	17.43	100.33

I.4.2.b. Composition minéralogique

La recherche de minéraux composant le kaolin DD₃ est menée au moyen d'un diffractomètre de rayons X sur une plage de 0 à 65 °C (Figure I.5).

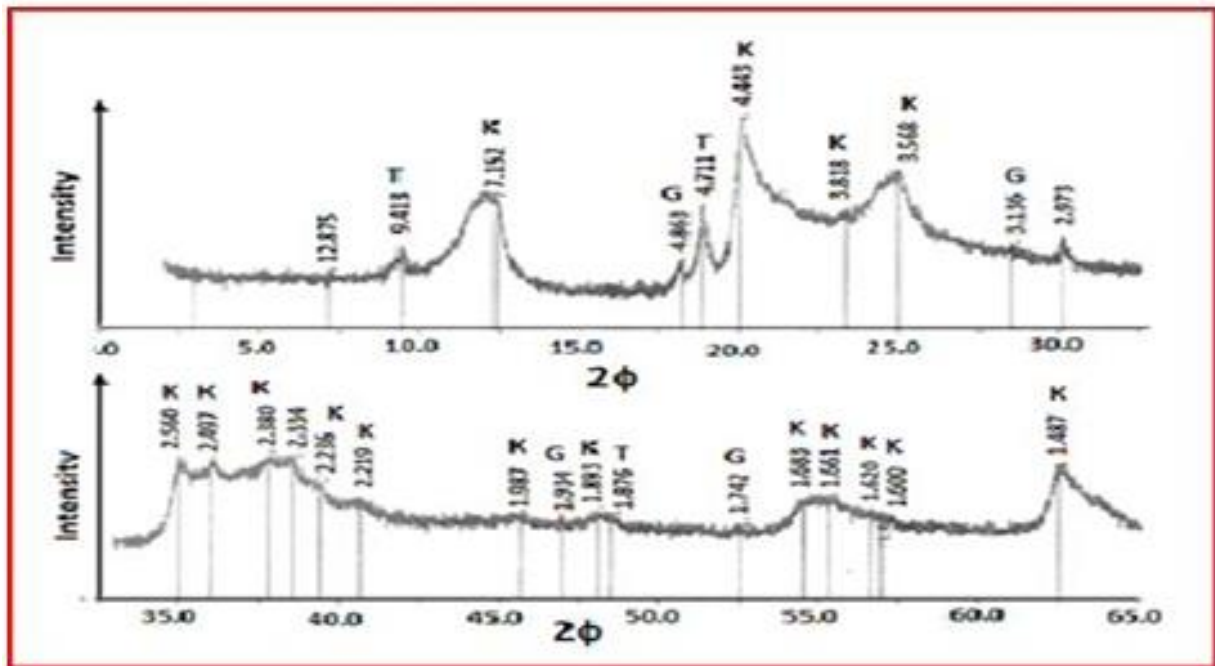


Figure I.5. Analyse minéralogique par DRX du kaolin DD3

Cette analyse révèle que le kaolin DD₃ est constitué de trois phases cristallines principales. La première, largement dominante, est la kaolinite. La deuxième phase est la gibbsite, $\text{Al}(\text{OH})_3$, identifiée par quatre pics attribuables à ce minéral riche en alumine. Enfin, la troisième phase correspond à la todorokite, un minéral porteur de manganèse, reconnaissable par sa couleur noire et la présence de deux types d'oxydes de manganèse (*Rabehi B.*, 2013).

Les images MEB illustrées par la photo (I.3.) indiquent que le DD₃ utilisé présente une structure tubulaire et fibreuse.

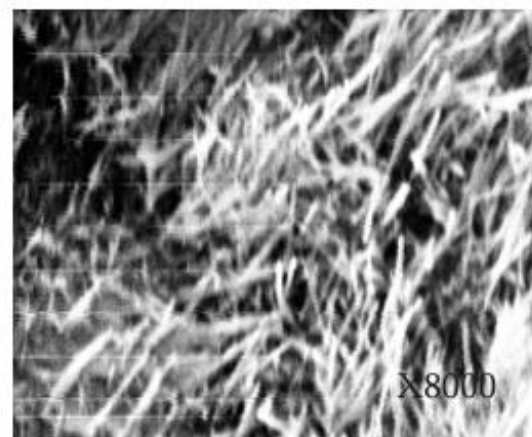
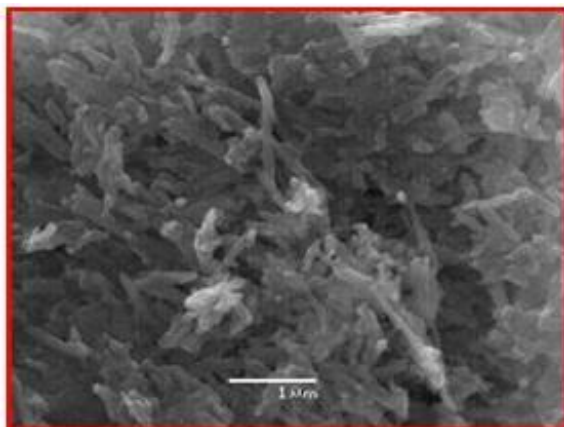


Photo I.3. Photo MEB du Kaolin DD₃

I.5. Kaolin de Tamazert (El-Milia wilaya de Jijel)

I.5.1. Situation géographique

Le gisement se trouve dans la ville d'El-Milia située au Nord-Est de l'Algérie, au croisement de deux routes, la N° 43, entre Skikda-Jijel et la N°27, entre Constantine-Jijel. C'est la plus importante unité de Kaolin du point de vue réserve (8 – 10MT) (*Cheknoun R. et Rabia H., 2015*).

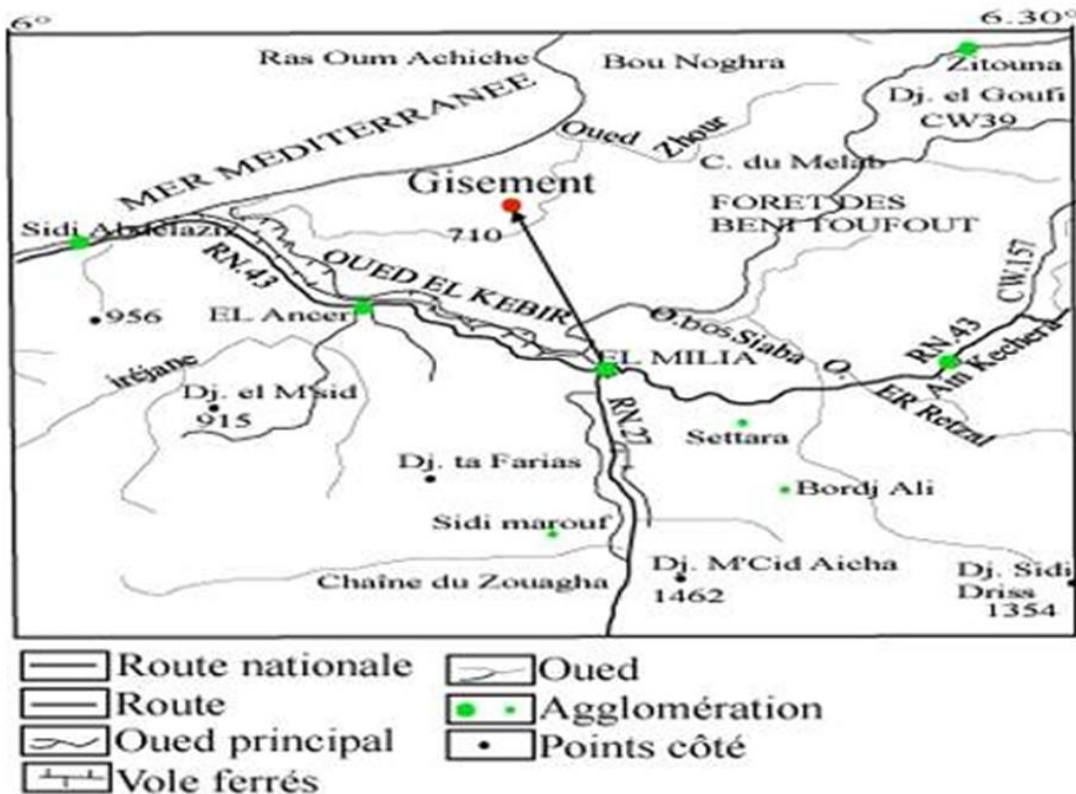


Figure I.6. Situation géographique du gisement (extrait de la carte géographique de Constantine au 1/500 000)

I.5.2. Composition minéralogique

Le kaolin du gisement de Tamazert est composé de :

- Kaolinites contenant presque toujours du fer sur les particules claires.
- L'oxyde de titane très fréquent en cubes ou en hexagones allongés.
- La gibbsite observée sous forme globulaire, de section carrée à rectangulaire.
- Les oxydes et hydroxydes de fer se présentant en amas composés de petits grains accolés de très petite taille.
- Le quartz, en général plus grossier que la kaolinite, de forme variable (*Chouafa M., 2016*).

Chapitre II

LE KAOLIN DANS LES

CERAMIQUES ET DANS

LES ECO-CIMENTS

COMPOSÉS

Le kaolin est un minéral naturel très important pour de nombreuses industries. Dans l'industrie de la céramique, le kaolin joue un rôle essentiel dans la production d'articles sanitaires, de carreaux et de vaisselle. Dans le domaine de l'éco-ciment, le kaolin est utilisé comme substitut partiel du ciment traditionnel, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂ lors du processus de fabrication. En transformant le kaolin en métakaolin par traitement thermique, les propriétés du ciment pouzzolanique sont améliorées.

II.1. Le kaolin dans les céramiques

Un matériau céramique est considéré comme un solide inorganique et non métallique. Ainsi, ces matériaux sont caractérisés par leurs compositions chimiques. On retrouve parmi eux les matériaux inorganiques non métalliques obtenus par fusion, comme les verres et les réfractaires ainsi que les liants hydrauliques tels que le ciment, le béton et le plâtre, qui durcissent au contact de l'eau. (Madaci I. et Zelmati M, 2018).

II.1.1. Les céramiques

Elles sont classées en trois catégories :

1) Les céramiques traditionnelles

Les céramiques conventionnelles sont produites en façonnant la matière plastique par l'ajout d'eau et en procédant ensuite à leur cuisson. Les céramiques traditionnelles sont principalement composées d'argile. On incorpore du feldspath (un agent de fusion) aux céramiques de la plus haute qualité (S. Mansouri, 2020). Le tableau II.1 qui suit présente les principaux types de céramiques traditionnels et leurs modes d'emploi.

Tableau II.1. Types de céramiques traditionnelles et leurs modes d'emplois

Céramiques traditionnelles		
Nuances	matières premières	exemples d'emploi
terre-cuite	marnes, argiles	tuiles, briques, horticulture,
Faïence	argile, silice, quartz	vaisselles, carrelage (mur), art
produits grésés	argile, kaolin, feldspath	Carrelage (sol)
réfractaires	argile réfractaire, silice, chamotte, alumine, magnésie, carbone-graphite...	Ciment, béton, brique pour four, produits frittés
grés cérame	argile, chamotte, silice	Eviers, lavabos, baignoires
Vitréous	argile, kaolin, feldspath, silice	
Porcelaine	Kaolin, argile, feldspath, quartz	Vaisselle, art, optique
Verres	silice alumine oxydes chaux magnésie	silico-calcique
		(oxyde de plomb)
		borosilicate
		aluminosilicates
Abrasifs	Oxydes, carbures, diamant	spéciaux
		Optique, laser, fibre optique
		Meules, papiers abrasifs

2) Les céramiques techniques

Elles sont façonnées à partir d'une poudre synthétisée (*Mansouri S. 2020*). La densification et la consolidation sont réalisées grâce à un processus thermique appelé frittage. Le frittage est une opération thermique au cours de laquelle un ensemble de particules individuelles ou un matériau poreux est densifié jusqu'à atteindre sa compacité maximale (*Philippe C., 2013*). La photo II.1 présente les principales applications industrielles des céramiques techniques.



Pièces de roulements (Si_3N_4)



Bougie de voiture etébauche en céramique



Combustible nucléaire (UO_2)



Isolateur électrique (Al_2O_3)

Photo II.1. Quelques exemples de céramiques techniques.

3) Les céramiques naturelles

Elles appartiennent à 2 groupes principaux (*Winnacker et Küchler, 1965*) : les produits à pâtes poreuses (Tableau II 2) et les produits à pates imperméables, denses et frittés (Tableau II.3).

Tableau II.2. Produits céramiques à pâtes poreuses

Matériaux de construction non réfractaires	Briques, tuiles, pierres de forme poreuses, briques de parement, terres cuites pour le bâtiment, drains.
Réfractaires	Pièces pleines, pièces creuses (cazettes, moufles, tuyaux, creusets, pots de verrerie, cornues)
Poterie domestique à pâte teintée	Pots, faïences commune, pots de fleurs, objets ornementaux.
Poterie à pâte blanchissant à la cuisson	Faïences domestiques, grès sanitaires.

Tableau II.3. Céramiques à pâtes imperméables

Tessons opaques, matériaux de construction	Ne blanchissant pas à la cuisson : clinkers, carreaux, tuyaux de canalisation. Blanchissant à la cuisson : pierres réfractaires, isolateurs
Produits et ustensiles	Ne blanchissant pas à la cuisson : outillage chimique, isolateurs, stealite. Blanchissant à la cuisson : objets domestiques (parfois teintés artificiellement), produits wedwood.
Tessons translucides, matériaux de construction	Porcelaine électrotechnique, pierres de garnissage
Objets d'usage domestiques	Porcelaine dure, porcelaine tendre, porcelaine sanitaire.

II.1.2 Les emplois du kaolin dans les céramiques

Les kaolins employés dans le secteur de la céramique doivent avoir des attributs spécifiques pour chaque utilisation. La fabrication de céramiques sanitaires requiert des produits à grains larges pour favoriser un moulage rapide des pièces. L'industrie de la faïence peut se satisfaire de kaolins contenant des quantités non négligeables de fer et conduisant à une faible résistance mécanique avant cuisson. Cependant, les matériaux employés dans la fabrication de la porcelaine doivent contenir peu de composants ferriques (*Cheknoun R., 2015*).

Le tableau II.4 qui suit présente la composition et les propriétés du kaolin utilisé en céramique.

Tableau II.4. Composition et propriétés du Kaolin utilisé en céramique

	Compositions et propriétés du Kaolin utilisé en céramique	
	Propriété	Pourcentage
Composition chimique	SiO ₂	48-49
	Al ₂ O ₃	36.1-37
	Fe ₂ O ₃	0,1-0,3
	TiO ₂	0,02-0,10
La taille des grains	Moins de 2µm	40-70
	Moins de 10µm	80-96
	Moins de 53 µm	100
Autres	Module de rupture	10-31
	Blancheur	75-90

II.1.1.a. Les porcelaines

Les porcelaines sont des céramiques à pâte dure. Elles sont obtenues à partir d'un mélange de kaolin (55 %), de feldspath (25 %) et de quartz (20 %) cuit à 950°. La porcelaine grâce au kaolin a la particularité de rester blanche après la cuisson (*Siligardi. C, 2009*).

La porcelaine est non poreuse (0% de porosité), translucide sous faible épaisseur, résistante aux chocs thermiques et mécaniques.



Photo II.2. Assiettes en porcelaine

II.1.1.b. Les éviers

Le kaolin joue un rôle essentiel dans la fabrication des éviers grâce à ses propriétés spécifiques. Ce minéral, utilisé depuis des siècles dans l'industrie céramique, se distingue par sa blancheur naturelle et sa finesse, offrant ainsi un aspect esthétique et raffiné aux éviers. Sa résistance aux hautes températures et aux produits chimiques en fait un matériau idéal pour assurer la durabilité des équipements sanitaires. De plus, sa malléabilité lors du façonnage permet de créer des formes variées, adaptées aux besoins des utilisateurs. Enfin, le kaolin contribue à la solidité des éviers, leur permettant de supporter les chocs et les variations de température sans se fissurer ni se déformer. Grâce à ces qualités, il reste un composant incontournable dans la fabrication des éviers modernes.



Photo II.3. Évier en kaolin

II.1.2. Le kaolin dans la construction

II.1.2.a. Les briques émaillées

Réalisé à base d'argile blanche (kaolin) quelquefois émaillée utilisée dans la réalisation de la faïence dans une cuisine ou une salle de bain (Photo II.4)



Photo II.4. Brique blanche en terre cuite émaillée.

II.1.2.b. Les carrelages

Le kaolin n'est pas couramment utilisé dans la composition de masse pour carreaux, qui sont généralement constitués d'argile et de fondant (feldspath). Dans les carreaux modernes, à faible porosité (les grès porcelaines), la masse doit être claire après cuisson. C'est la raison pour laquelle du kaolin est incorporé dans le carrelage en substitution d'une partie d'argile. Pour des raisons de coût, le kaolin utilisé peut être de qualité moyenne à basse, et de granulométrie grossière (45-60 μm) (*Achin I. et Guillaneau JC, 2018*).



Photo II.5. Carrelage (Dalle de sol) en kaolin

II.1.2.c. Les tuiles

Le kaolin est un ingrédient clé dans la fabrication des tuiles en raison de ses propriétés exceptionnelles qui améliorent la qualité du produit fini. Il confère une grande plasticité à l'argile, facilitant ainsi le moulage et la mise en forme des tuiles avant cuisson. Sa faible teneur en impuretés garantit une couleur homogène et lumineuse après cuisson, contribuant à l'aspect esthétique des tuiles. De plus, le kaolin joue un rôle essentiel dans la stabilité thermique du matériau, réduisant le retrait et les déformations lors du processus de cuisson à haute température. Ainsi, le kaolin est un élément incontournable dans l'industrie céramique pour produire des tuiles de haute qualité.

Le kaolin n'est pas utilisé *seul* pour fabriquer des tuiles, mais entre dans la composition de nombreux types de tuiles céramiques pour ses qualités techniques.



Photo II.6. Tuile blanche contenant du kaolin pour absorber moins de chaleur, et maintenir une température intérieure plus fraîche en été.

II.2. Le kaolin dans les ciments écologiques

Les matériaux pouzzolaniques sont utilisés depuis longtemps dans l'industrie du ciment. La majorité de ces matériaux sont des coproduits d'autres industries, comme les cendres volantes de charbon, les scories de hauts fourneaux ou la silice fumée. Le métakaolin, produit par calcination du kaolin à 650-800°C, est une pouzzolane hautement réactive adaptée à une utilisation comme matériau de ciment dans le béton. Les particules de métakaolin sont près de dix fois plus petites que les particules de ciment, ce qui permet de produire un béton plus dense et plus imperméable. L'utilisation de métakaolin dans le béton augmente la durabilité et améliore également les propriétés mécaniques (*Gillott, 1987*).

La substitution du clinker par du kaolin, plus précisément par du métakaolin (résultat de la calcination du kaolin), est une méthode utilisée pour réduire la teneur en clinker dans le ciment et ainsi **diminuer l'impact environnemental** de sa fabrication. On parle alors de **ciment écologique ou ciment vert**.

Le métakaolin, avec ses propriétés pouzzolaniques, peut remplacer une partie du clinker tout en conservant, voire améliorant, certaines propriétés du ciment.

L'étude de cas que nous présentons dans le chapitre 3 qui va suivre est un parfait exemple de l'apport du kaolin calciné sur certaines propriétés du mortier. Celui-ci est utilisé comme substitut partiel du clinker du ciment.

II.3. Le kaolin dans la fabrication du ciment blanc

Les métakaolins présentent des caractéristiques pouzzolaniques très élevées, qui en font d'excellents additifs pour les mortiers et bétons à base de ciment Portland. La kaolinite, en tant que source d'alumine, permet d'éviter la présence de fer pour la production de ciment blanc [*Goyal et al. 2009*].

La teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et kaolin) exemptes d'oxyde de fer. Les ciments blancs sont des ciments de type CEMI ou CEM II conformes à la norme NF EN 197 - 1.

Ils sont généralement utilisés dans le mortier de montage pierres naturelles, de petites briques pleines, ainsi que leur jointoiement. Utilisés également dans le mortier de montage pour blocs d'agglomérés béton (parpaings), dans les réparations ponctuelles de maçonneries et dans les scellements.

Le ciment blanc en Algérie est régi par la norme NA 442-2013. Cette norme est spécifique aux ciments utilisés dans le secteur du bâtiment en Algérie.

Quelques autres utilisations :

- Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents. La pâte peut être elle-même colorée à l'aide de pigments, ce qui offre une grande variété de teintes pour les bétons architectoniques et les enduits décoratifs.
- Comme ciment colle blanc pour la pose de carrelages et pierres naturelles de toutes porosités, la pose sur sol intérieur et extérieur sur support neuf et ancien et la pose sur mur intérieur et extérieur, support neuf et ancien.

Chapitre III

ETUDE DE CAS

Properties of Mortars with Algerian Metakaolin

(Propriétés de mortiers à base de métakaolin Algérien)

III.1. Introduction

Le travail présenté dans ce qui suit est un travail d'ordre expérimental réalisé sur un mortier à base de métakaolin algérien intitulé « Properties of mortars with algerian metakaolin » (Mansour M.S et al. 2011).

Le travail réalisé avait comme objectif d'étudier l'effet du métakaolin algérien (MK) sur la résistance à la compression (compressive strength), la chaleur d'hydratation (hydration heat) et la résistance aux attaques acides (acidic attack resistance) des mortiers.

Nous nous intéresserons dans ce qui va suivre à seulement deux principales caractéristiques étudiées : la résistance à la compression et la résistance aux attaques acides des mortiers.

III.2. Procédure expérimentale

III.2.1. Matériaux utilisés

Les composants du mélange étaient du ciment Portland ordinaire (OPC) CEM I 52.5, du MK algérien (obtenu par traitement thermique de kaolin algérien, provenant de la carrière d'El-Milia, dans l'est de l'Algérie, à 850 °C pendant 3 heures), de l'eau et du sable normalisé (norme CEN EN 196-1). Le superplastifiant (SP) utilisé était un liquide à base de polycarboxylate modifié contenant 80 % d'eau et une masse volumique de 1,07 g/cm³. La composition et les propriétés du ciment (OPC) et du MK sont présentées dans le tableau 1.

III.2.2. Mélanges étudiés

Les mélanges de mortier présentaient les proportions suivantes : 1 masse de liant pour 3 masses de sable. Le liant est composé de ciment et de MK.

La formulation du ciment a été effectuée en faisant varier le remplacement du MK de 0 % à 30 %. Tous les remplacements ont été effectués en masse. Le rapport eau/liant (E/L) a été maintenu constant à 0,5.

Un superplastifiant SP a été ajouté pour obtenir un temps d'écoulement du mortier d'environ 10 ± 1 secondes dans un maniabilimètre à mortier.

Le tableau 2 qui suit présente la formulation des ciments composés étudiée pour la détermination de la résistance des mortiers.

Tableau 1. Composition chimique et propriétés du ciment et du MK

	OPC	MK
SiO ₂ (%)	20.23	55.50
Al ₂ O ₃ (%)	4.29	40.00
Fe ₂ O ₃ (%)	2.35	1.40
CaO (%)	63.67	0.08
MgO (%)	3.88	0.22
SO ₃ (%)	2.80	--
Na ₂ O (%)	0.14	0.09
K ₂ O (%)	0.69	0.71
TiO ₂ (%)	0.25	0.24
I. R (%)	0.39	--
L.O.I. (%)	1.63	1.00
CaCO ₃		
MgCO ₃		
Surface specific area (m ² /kg)	359.00	
Surface specific BET (m ² /g)		16.0
Initial time of set:	2h 45 min	
Final time of set:	4h 55 min	

OPC= Ordinary Portland Cement

Surface specific area = Surface spécifique Blaine

MK= Metakaolin

Surface spécifique BET = Surface spécifique par microscopie à balayage

Initial time of set = Temps du début de prise

Final time of set = Temps de fin de prise

III.2.3. Préparation des échantillons, cure et essais

III.2.3.a. Résistance à la compression

Des éprouvettes de mortier prismatiques de dimensions 40 x 40 x 160 mm ont été utilisées pour cette étude. Elles ont été coulées dans des moules en acier et conservées dans une chambre humide à 20 °C pendant 24 h. Après démoulage, elles ont été placées dans de l'eau à 20 °C pendant une période de cure totale de 365 jours. La résistance à la compression a été déterminée à 1, 7, 28, 90 et 365 jours conformément à la norme EN 196-1. Les résistances à la compression présentées sont les valeurs moyennes obtenues sur trois éprouvettes.

Tableau 2. Composition des mélanges de mortiers

	Cement [g]	MK [g]	Sand [g]	W/B [%]	SP [%]
OPC	450	0	1350	0.5	0.0
10% MK	405	45	1350	0.5	0.3
20% MK	360	90	1350	0.5	0.5
30% MK	215	135	1350	0.5	0.9

Sand = Sable normalisé, W/B = Water/Binder = Eau/Liant = E/L

III.2.3.b. Chaleur d'hydratation

Les tests de la chaleur d'hydratation ont été réalisés selon la norme européenne NF EN 196-9.

III.2.3.c. Résistance aux attaques acides

La résistance aux attaques acides a été évaluée sur des échantillons de mortier par immersion dans deux solutions : acide chlorhydrique (HCl) à 1 % ou acide sulfurique (H₂SO₄) à 2,5 %.

La perte de poids a été mesurée sur une période de 225 jours. L'attaque acide relative a été déterminée conformément à la norme ASTM C-267 (American Society for Testing Material).

Les échantillons de mortier ont été mûris dans de l'eau à 20 ± 2 °C pendant 30 jours avant d'être soumis à l'attaque acide. Trois échantillons de chaque mélange de mortier ont été immergés dans de l'acide sulfurique à 2,5 % (H₂SO₄) ou de l'acide chlorhydrique à 1 % (HCl).

Les parties attaquées des échantillons ont été nettoyées à l'eau déminéralisée ; l'attaque acide a été évaluée par la mesure de la perte de poids (WL) des échantillons, déterminée comme suit :

$$WL(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Où W₁ est le poids de l'échantillon avant immersion et W₂ celui de l'échantillon nettoyé après immersion. La solution a été renouvelée tous les 15 jours et la perte de poids a été mesurée.

III.3. Résultats et discussions

III.3.1. Chaleur d'hydratation

Les résultats d'essais ont été présentés sous forme de graphes dans deux figures différentes (Figure 1 et figure 2)

III.3.2. Résistance à la compression

La figure 3 présente les résistances à la compression en fonction de l'âge des échantillons testés.

La substitution du ciment par 10 % de MK dans l'échantillon de mortier a permis un développement de la résistance plus rapide que celui du mortier de ciment. Après 365 jours de durcissement, les échantillons de mortier contenant 10 et 20 % de MK présentent une résistance à la compression supérieure à celle du mortier de ciment.

La figure 4 présente la résistance relative en fonction de l'âge. La résistance relative est le rapport entre la résistance du mortier MK et celle du mortier de ciment à chaque âge. L'incorporation de 10 et 20 % de MK est particulièrement utile pendant les 28 premiers jours, où le taux de développement de la résistance est considérablement plus élevé que celui du témoin. Après 28 jours d'âge, l'incorporation de MK n'entraîne pas d'augmentation du taux de développement de la résistance.

Selon Wild et al. [1996], trois facteurs fondamentaux influencent la contribution du MK à la résistance à la compression lorsqu'il remplace partiellement le ciment dans le béton. Il s'agit de : (i) l'effet de remplissage immédiat, qui permet un compactage plus efficace de la pâte ; (ii) l'accélération de l'hydratation des ciments, dont l'impact est maximal dans les 24 premières heures ; et (iii) la réaction pouzzolanique du MK avec la liaison CH (Carbone-Hydrogène), qui contribue le plus à la résistance entre 7 et 14 jours.

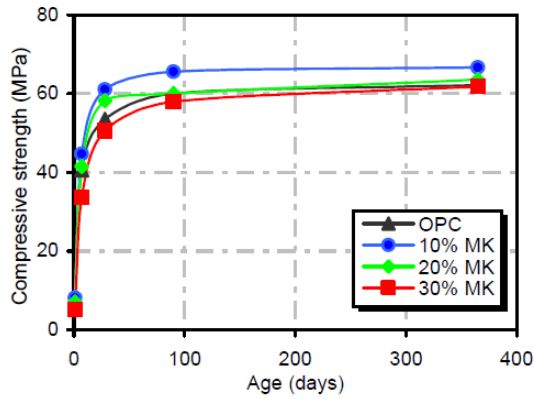


Figure 3. Compressive strength vs. time for mortar samples.

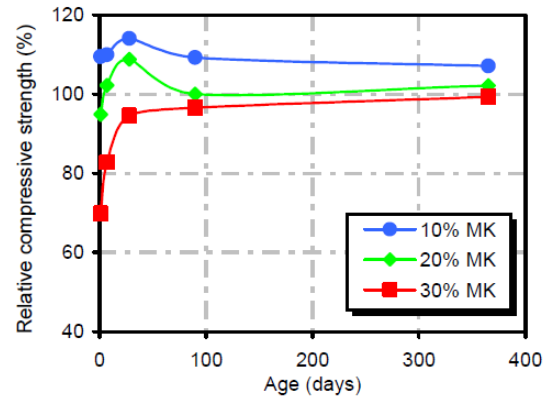


Figure 4. Relative compressive strength vs. time of mortars samples.

III.3.3. Durabilité

La figure 5 présente les résultats des essais de variation de poids en fonction du temps pour des échantillons de mortier exposés à des solutions de HCl à 1 % et de H₂SO₄ à 2,5 % pendant 225 jours respectivement. Après 225 jours d'exposition à des solutions de HCl à 1 %, la perte de poids totale du mortier de ciment était de 25 %. Lorsque le taux de remplacement du ciment était de 10, 20 et 30 % de MK, la perte de poids des échantillons de mortier était respectivement de 17, 16 et 12 %.

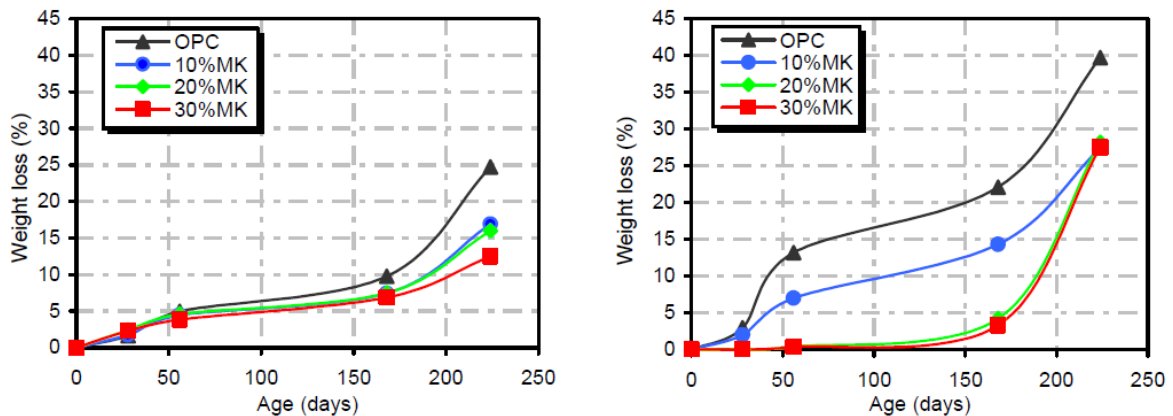


Figure 5. Weight loss for mortar specimens immersed in (a) 1% HCl and (b) 2.5% H₂SO₄.

Après 225 jours d'exposition à des solutions de H_2SO_4 à 2,5 %, la perte de poids totale du mortier de ciment était d'environ 40 %. Lorsque le taux de remplacement du ciment était de 10, 20 et 30 % de MK, la perte de poids des trois échantillons de mortier était de 28 %.

Par conséquent, on peut conclure que le MK peut être utilisé pour améliorer la résistance aux acides du mortier de ciment.

Selon Hewadey et al. [2007], cela est dû à la formation d'hydrates d'aluminate de calcium (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} , C_3AH_6) dans le mortier de MK. Ces hydrates sont chimiquement plus stables dans les environnements très acides que les hydrates de silicate de calcium (C-S-H).

Goyal et al. [Goyal et al. 2009] ont étudié l'effet d'un environnement chimique agressif sur du béton préparé avec du ciment Portland ordinaire et de la fumée de silice. Les conditions environnementales défavorables sont simulées en utilisant 1 % d'acide sulfurique, 1% d'acide chlorhydrique ou 1% d'acide nitrique. Les auteurs ont mesuré la perte de masse et la résistance à la compression sur une période d'un an. Ils ont constaté que l'évolution de l'attaque acide dépend du type d'acide et de la solubilité du sel de calcium formé.

III.4. Conclusions

Le kaolin local a été activé thermiquement et utilisé comme pouzzolane dans les ciments composés. Cette étude aboutit aux conclusions suivantes :

- ✓ Le MK algérien est un adjuvant minéral actif qui pourrait être utilisé dans les produits à base de béton de ciment. Il a un effet positif sur les propriétés mécaniques des mortiers de ciment.
- ✓ Le mortier composé contenant 10% de MK peut atteindre une température d'hydratation supérieure à celle du mortier de ciment. Il serait préférable de ne pas utiliser de béton MK lorsque la température d'hydratation peut poser problème, par exemple dans les éléments de masse où la fissuration est probable.
- ✓ La résistance aux attaques acides est supérieure pour les mélanges de ciment à base de métakaolin par rapport aux mélanges témoins.

Sept références bibliographiques ont été utilisées par les auteurs pour appuyer les résultats de leurs travaux. Elles sont disponibles en fin de publication.

Dans ce qui suit, nous apportons nos commentaires sur ces travaux.

NOS COMMENTAIRES SUR CETTE ETUDE DE CAS

Les auteurs de ce travail, rédigé en langue anglaise et présenté à la conférence « International conference on durability of building materials and components. Porto – Portugal. April 12 th – 15 th, 2011 » ont étudié l'effet d'un kaolin local qui provient d'une carrière à El Milia (Jijel) sur quelques propriétés d'un mortier normal.

Le kaolin étudié, de grande finesse, 16 m²/g (4 fois plus que celle du ciment) a été préalablement soumis à un traitement thermique pendant 3 heures à une température de 850°C.

Les taux de kaolin (devenu métakaolin MK après traitement thermique) ont été 10, 20 et 30% en substitution massique du ciment composé utilisé.

Les propriétés étudiées sont :

- La résistance à la compression jusqu'à 365 jours ;
- La chaleur d'hydratation ;
- La durabilité, en termes de résistance aux attaques acides (HCl à 1 % et H₂SO₄ à 2,5 %).

Les auteurs sont arrivés à quelques conclusions intéressantes :

- 1- Le MK algérien utilisé améliore les résistances à la compression des mortiers lorsqu'il est utilisé aux taux de 10 et 20 % ;
- 2- Pendant les 28 premiers jours, le développement de la résistance est considérablement plus élevé ;
- 3- Concernant la durabilité, les résultats expérimentaux ont prouvé que le MK incorporé dans le ciment peut entraîner une bonne résistance aux attaques acides, à tous les pourcentages de substitution, surtout aux attaques de l'acide sulfurique.

Principal résultat après 225 jours d'immersion dans les acides :

✓ Avec HCl (1 %)

Perte de poids avec MK = 0% : 25%

Perte de poids avec MK = 10, 20 et 30% : 17, 16 et 12% respectivement.

Soit un gain de résistance de 8, 9 et 13%

✓ Avec H₂SO₄ (2,5 %)

Perte de poids avec MK = 0% : 40%

Perte de poids avec MK = 10, 20 et 30% : 28%

Soit un gain de résistance de 12%

Avec cette étude, il a été confirmé que le kaolin traité thermiquement peut trouver en Algérie une application intéressante dans la fabrication du ciment composé, comme adjuvant minéral. Un gain appréciable en résistance mécanique et en résistance aux attaques acides peut être obtenu.

Chapitre IV

PARTIE

EXPÉRIMENTALE

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats de quelques essais expérimentaux sur l'effet d'un kaolin commercialisé en Algérie sur le comportement d'un ciment composé élaboré par substitution du ciment portland CEMII/B-L 42,5 N par le kaolin d'étude.

Les essais ont été réalisés en partie au laboratoire pédagogique du département GC université du 8 mai 1945 Guelma, l'autre partie a été réalisé au laboratoire LNHC Belkheir Guelma.

Il s'agit des essais suivants :

- Détermination de la granulométrie du sable utilisé pour la confection des mortiers pour essais mécaniques sur le ciment composé d'étude.
- Masse volumique apparente (Mv) et masse volumique absolue (ou masse spécifique Ms) de ce même sable.
- Effet de la substitution du taux de kaolin sur la consistance normale du ciment composé d'étude.
- Effet de la substitution du taux de kaolin sur le début de prise du ciment composé d'étude.
- Effet de la substitution du taux de kaolin sur les caractéristiques mécaniques du mortier élaboré avec le ciment composé d'étude.

IV.2. Matériaux utilisés

IV.2.1. Ciment

C'est le ciment portland CEMII/B-L 42,5 N de haute performance, de couleur grise. Il est certifié, conforme à la norme algérienne (NA 442-2013), et européenne (EN 197-1), voir photo IV.1.

Il est fabriqué à partir de clinker, un mélange de calcaire et d'argile traité à la température de 1450 °C. Grâce à ses propriétés de durcissement rapide, sa faible demande en eau et sa compatibilité avec divers adjuvants, il est idéal pour les constructions exigeantes telles que les grands édifices, les ponts et les barrages. Ce ciment est fabriqué à l'usine de LAFARGE de Biskra (CILAS).



Photo IV.1. Ciment utilisé

Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont rassemblées dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3, et IV.4 suivants. Les caractéristiques complètes sont présentées dans l'annexe N°1 de ce mémoire.

Tableau IV.1. Analyse chimique

Analyse chimique	Valeur
Perte au feu (NA5042) (%)	10.0 ± 2
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium (MgO) (%)	Max 5%
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	< 0.1

Tableau IV.2. Propriétés physiques

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

Tableau IV.3. Temps de prise

Temps de prise à 20° C (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	150 ± 30
Fin de prise (min)	230 ± 50

Tableau IV.4. Résistance à la compression à 2 et 28 jours d'âge

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

IV.2.2. Kaolin

C'est un kaolin d'origine portugaise commercialisé en Algérie sous le nom de kaolin Q130S. Il contient un taux élevé d'alumine Al_2O_3 (36.0%), semblable de ce point de vue à celui de Djebel Debagh DD₃ (entre 36 et 40%). Sa masse volumique est de 980 kg/m³

Sa température de cuisson est 1185 °C.

Sa blancheur déterminée par le fabricant est caractérisée par la valeur L94 (Luminosité 94 sur 100 maximum).

Les caractéristiques complètes sont notées dans l'annexe N° 2 de ce mémoire.

La photo VI.2 suivante montre ce kaolin sous forme de poudre.



Photo IV.2. Kaolin en poudre utilisé

IV.2.3. Sable

C'est un sable de mer de couleur jaunâtre collecté du littoral de la région de Skikda. Ses caractéristiques telles que déterminées expérimentalement sont décrites dans la section IV.4 du présent mémoire.

IV.2.4. Eau de gâchage

C'est l'eau potable du robinet du laboratoire pédagogique du département GC université du 8 mai 1945 Guelma. Son pH est voisin de 7 et son utilisation est convenable pour la confection des mortiers et bétons

IV.3. Méthodes d'essais

IV.3.1. Granulométrie du sable

L'essai a été réalisé par tamisage à sec dans les tamis de mailles $2 - 1 - 0.5 - 0.125 - 0.063$ mm à l'aide d'une tamiseuse électrique (Photo IV.3) conformément à la norme NF-EN 933-1. Le sable a été préalablement séché dans une étuve à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.

IV.3.2. Masse volumique apparente (M_v) et masse volumique absolue (M_s)

L'essai a été réalisé conformément à la norme NF-EN 1097-6. La balance électronique utilisée (Photo IV.4) est précise à 1 g près. M_v a été déterminée par la méthode du moule sur un volume de sable égal à 1 dm^3 (Figure IV.1) et M_s par la méthode de l'éprouvette graduée sur une masse de sable égale à 300 grammes (Figure IV.2). Notons que M_v et M_s ont été déterminées 3 fois chacune et la moyenne des mesures a été prise en considération.



Photo IV.3. Tamiseuse électrique utilisée



Photo IV.4. Balance électronique utilisée

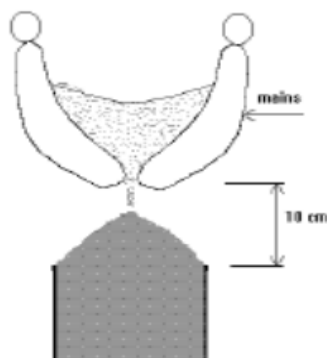


Figure IV.1. Moule pour mesure de M_v

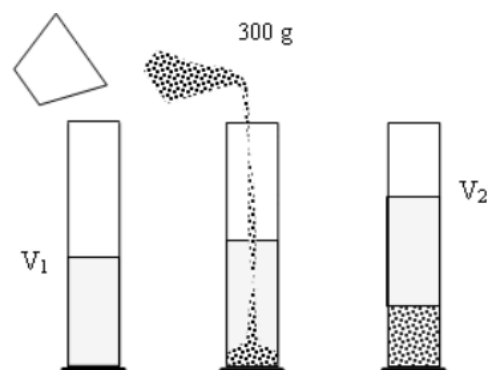


Figure IV.2. Schéma de mesure de M_s

IV.3.3. Consistance normale du ciment

L'essai a été réalisé conformément à la norme NF-EN 196-3. L'appareil de mesure est l'appareil de Vicat (Figure IV.3) disponible au niveau du laboratoire LNHC Belkheir Guelma. Il est composé d'un moule tronconique ($h=40$ mm $d_1=70$ mm et $d_2=80$ mm) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de diamètre $\Phi = 10$ mm.

Un malaxeur à mortier a été utilisé pour malaxer la pâte de ciment avec différents rapports E/C. Lorsque la sonde est lâchée dans la pâte de ciment confectionnée et pénètre jusqu'à $d = 6$ mm ± 1 mm, on dit alors que la consistance de la pâte étudiée est normalisée (Consistance normalisée). Le rapport E/C est alors adopté. La quantité de ciment utilisée est $M = 500$ g.

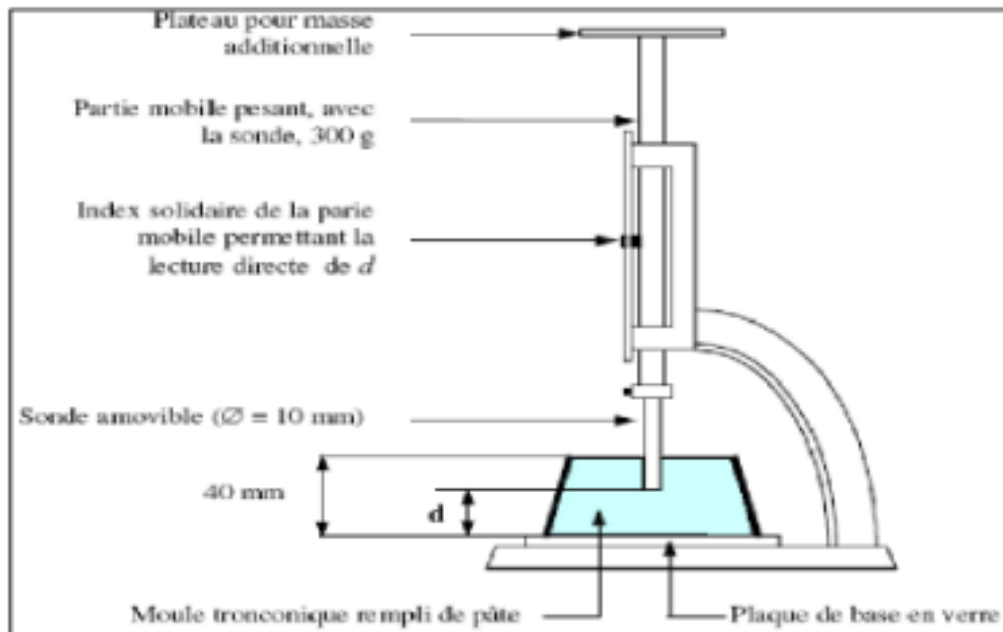


Figure IV.3. Appareil de Vicat avec sonde

IV.3.4. Prise du ciment

L'essai est réalisé sur le même appareil. La sonde de Vicat est remplacée par une aiguille de 1.13 mm de diamètre et 300 g de masse (Figure IV.4). Le début de prise est obtenu lorsque l'aiguille s'enfonce jusqu'à 4 mm du fond du moule.

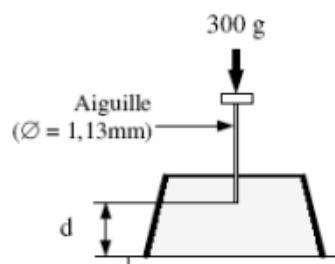


Figure IV.4. Aiguille de Vicat

IV.3.5. Essais mécaniques sur mortier

Le mortier testé est un mortier ayant la composition d'un mortier normal, soit :

- Sable : 1350 g
- Ciment : 450 g
- Eau de gâchage : 225 g

a) Essai de flexion simple

La presse hydraulique utilisée est du type Controlab d'une capacité de 3000 KN conforme à la norme NF EN 196-1. Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion (Photo IV.5) sont rompus en compression.

b) Essai de compression

L'essai de résistance à la compression est effectué par chargement monotone jusqu'à la rupture de l'éprouvette de mortier. L'éprouvette est placée au milieu du plateau comme le montre la photo IV.6. La surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de 16 cm^2 ($4 \times 4 \text{ cm}^2$).



Photo IV.5. Essai de flexion 3 points sur éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$



Photo IV.6. Essai de compression sur éprouvette $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$

IV.4. Résultats et analyse

IV.4.1. Granulométrie du sable

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau IV.5 qui suit et la courbe granulométrique correspondante dans la figure IV.5 ci-après.

Tableau IV.5. Résultats chiffrés.

Ouverture des mailles (mm)	Tamisé (%)
2,000	99,33
1,000	93,08
0,500	71,81
0,250	37,64
0,125	8,86
0,063	2,82
Fond	0,1

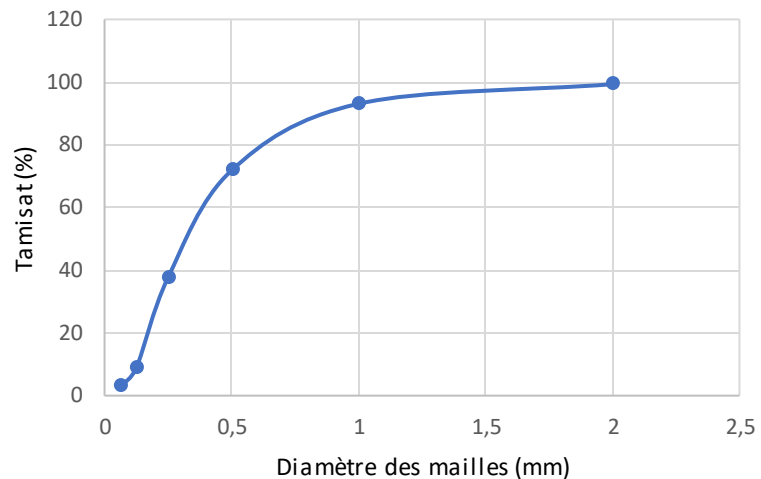


Figure IV.5. Courbe granulométrique du sable utilisé.

On peut remarquer que la courbe granulométrique est continue et que sa granularité est 0/2.

IV.4.2. Masse volumique apparente (Mv) du sable

La masse volumique Mv est déterminée par la relation qui suit :

$$M_v = (M_2 - M_1)/V$$

V : Volume du moule = 1 dm³

M₁ : Masse du moule = 1278.30 g

M₂ : Masse de l'échantillon de sable avec le moule

Les résultats expérimentaux de 3 essais sont regroupés dans le tableau IV.6 suivant.

Tableau IV.6. Masse volumique apparente

	V (cm ³)	Mv (g/cm ³)
Essai 1	1000	1.49
Essai 2	1000	1.48
Essai 3	1000	1.47

Mv moyenne = 1.48 g/cm³

IV.4.3. Masse volumique spécifique (Ms) du sable

La masse volumique Ms est déterminée par la relation qui suit :

$$M_s = M / (V_2 - V_1)$$

M : Masse du sable = 300 gr

V₁ : Volume d'eau introduit dans l'éprouvette

V₂ : Volume d'eau + volume du sable introduits dans l'éprouvette

Les résultats expérimentaux de 3 essais sont regroupés dans le tableau IV.7 suivant.

Tableau IV.7. Masse spécifique

	M (g)	Ms (g/cm ³)
Essai 1	300	2.67
Essai 2	300	2.73
Essai 3	300	2.61

$$M_s \text{ moyenne} = 2.67 \text{ g/cm}^3$$

IV.4.4. Effet du taux de kaolin sur la consistance normale du ciment élaboré

L'effet du kaolin a été déterminé par substitution massique du ciment par du kaolin. Les taux de substitution choisis sont des taux usuels de 5%, 10% et 15%.

Les quantités adoptées sont regroupées dans le tableau IV.8 qui suit :

Tableau IV.8. Substitution massique du ciment par du kaolin

	Substitution en gramme (g)			
	0%	5%	10%	15%
Ciment	450	427.5	405	382.5
Kaolin	00	22.5	45	65.7

La quantité d'eau utilisée a été telle que la pénétration de la sonde de Vicat était de 6 mm (conformément à la norme : EN 196-3).

Ces quantités d'eau sont :

- Pour 0% : 120 g
- Pour 5% : 125 g
- Pour 10% : 130 g
- Pour 15% : 140 g

Dans la figure IV.6 suivante nous présentons l'effet du taux de Kaolin (K) sur la quantité d'eau de gâchage (E) qu'il faut mettre en œuvre pour obtenir une consistance normale.

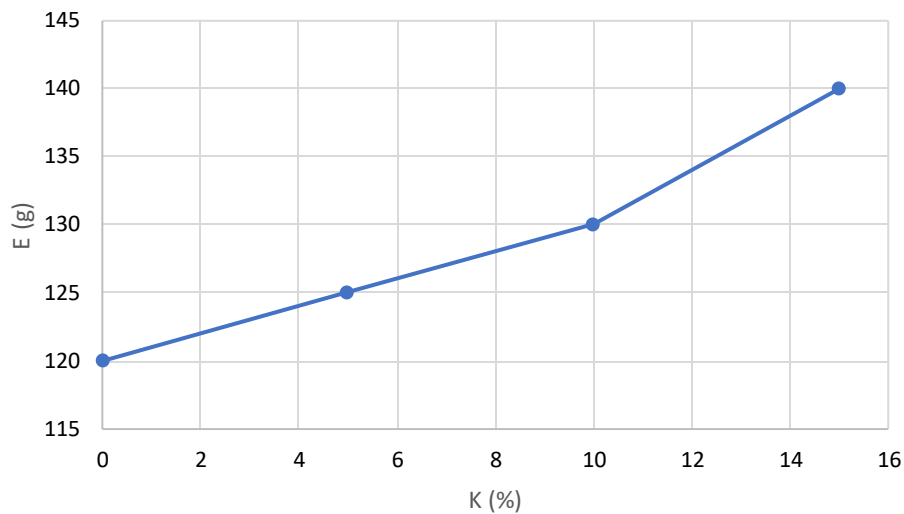


Figure IV.6. Effet du taux de kaolin sur la quantité d'eau de gâchage pour une consistance normale

On remarque que l'évolution de la quantité d'eau de gâchage (E) qu'il faut mettre en œuvre pour obtenir une consistance normale (Profondeur de pénétration de la sonde $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) est presque linéaire. Elle commence à dévier à partir de $K = 10\%$. Des essais complémentaires sont nécessaires pour confirmer ce point d'inflexion ainsi que la tendance suivante.

On peut conclure que le ciment composé avec du kaolin est un matériau plus avide en eau que le ciment sans. Plus on augmente le taux de substitution du ciment par le kaolin, plus la quantité d'eau de gâchage devient plus importante (pour une même consistance normale).

IV.4.5. Effet du taux de kaolin sur le début de prise du ciment élaboré

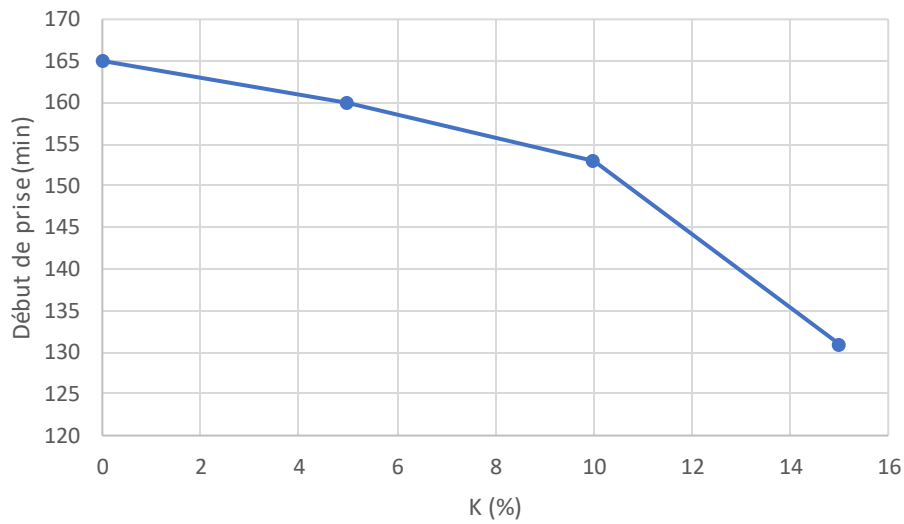
Cet effet a été étudié expérimentalement grâce à l'appareil de Vicat (Figure IV.3 précédente) muni d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre et 300 g de masse (Figure IV.4 précédente). Le début de prise correspond au moment (en minutes) où l'aiguille s'enfonce jusqu'à 4 mm du fond du moule.

Le temps $t = 0$ correspond au moment où l'aiguille est lâché dans le moule la première fois (début de l'essai)

Les résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau IV.9 et dans le graphe de la figure IV.7 suivants.

Tableau IV.9. Taux de kaolin et début de prise

Taux de substitution du kaolin (en %)	Début de prise (en minutes)
0	165
5	160
10	153
15	131

**Figure IV.7.** Effet du taux de kaolin sur le début de prise

On peut remarquer que le temps de début de prise diminue avec l'augmentation du taux de kaolin. La tendance est presque linéaire avec une déviation dans $K = 10\%$. Comme pour l'étude de la consistance normale (section IV.4.4), des essais complémentaires sont nécessaires pour confirmer ce point d'inflexion ainsi que la tendance qui suivra.

L'incorporation du kaolin accélère donc le début de prise du ciment.

Le gain de temps est de l'ordre de 20 % lorsque 15% de kaolin sont incorporés.

IV.4.6. Effet du taux de kaolin sur les résistances mécaniques du ciment élaboré

Il a été étudié sur un mortier ayant la composition d'un mortier normalisé. La résistance à la compression à 28 jours (R_{c28}) a été mesurée selon la procédure décrite dans la section IV.3.5 de ce mémoire. Si les essais de compression ont pu être réalisés et les résultats notés grâce au système d'asservissement de la machine (voir section qui suit), ceux de la flexion ne l'ont pas été en raison de l'endommagement du système expérimental.

Les éprouvettes prismatiques ont pourtant été préparées pour être rompues comme le montre la photo réelle IV.7 suivante. Dans la photo sont en effet visibles la date du test (15/04/25) et le taux de kaolin utilisé (15%).



Photo IV.7. Eprouvette de mortier avec 15% de kaolin sous la presse hydraulique

Les résultats chiffrés de R_{c28} en fonction du taux de kaolin sont consignés dans le tableau IV.10 qui suit et présentés graphiquement dans la figure IV.8.

Tableau IV.10. Résultats chiffrés

Taux de kaolin (%)	R_{c28} (MPa)
0	19.60
5	22.77
10	23.03
15	23.16

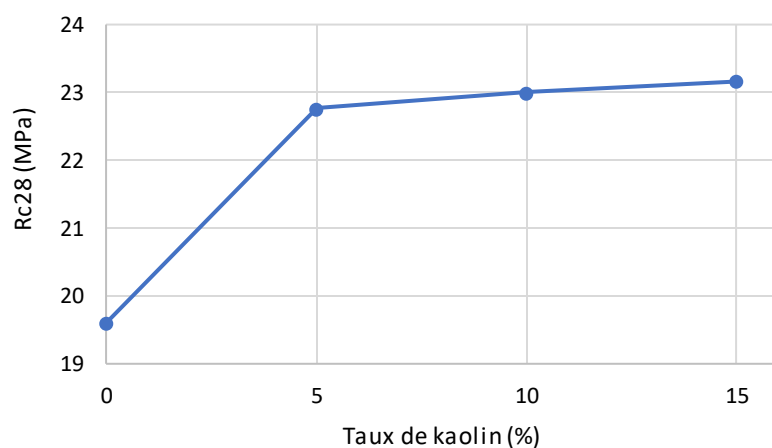


Figure IV.8. Variation de R_{c28} avec le taux de kaolin

Il est à noter que l'appareil d'essai est automatisé et que la vitesse de chargement lors des essais était de 0.25 KN/s telle que visible sur la photo IV.8.



Photo IV.8. Tableau d'affichage de l'appareil d'essai. Vitesse de chargement adoptée = 0.25 KN/s

Des résultats expérimentaux obtenus, on peut remarquer que les valeurs de R_{c28} augmentent avec l'augmentation de celles du kaolin. Cette évolution peut être expliquée par la finesse du kaolin par rapport à celle du ciment utilisé. Dans l'étude de cas présentée au chapitre 3 de ce mémoire, les auteurs ont noté une finesse du kaolin 4 fois supérieure à celle du ciment.

L'effet filler est probablement l'explication de cette évolution de R_{c28} (non linéaire et plus accentuée entre 0 et 5%).

Une autre explication supposée est la pouzzolanité du kaolin qui peut être plus importante dans le cas du kaolin utilisé. En effet, Aneb L. et al, (*Aneb L. et al, 2023*) ont trouvé des résultats similaires à 28 jours et ont avancé cette même explication. Ils ont conclu que le métakaolin est une pouzzolane hautement réactive adaptée à une utilisation comme matériau de ciment dans le béton. Les particules de métakaolin sont près de dix fois plus petites que les particules de ciment, ce qui permet de produire un béton plus dense. L'utilisation de métakaolin dans le béton augmente la durabilité et améliore également les propriétés mécaniques.

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce chapitre nous a permis de nous initialiser aux travaux expérimentaux de recherche scientifique et à l'analyse des résultats. Nous avons en effet effectué :

- Des essais de caractérisation : M_v kaolin, M_v et M_s sable de mer et analyse granulométrique du sable ;
- Des essais relatifs à l'effet du taux de kaolin sur la consistance normale du ciment élaboré ;
- Des essais relatifs à l'effet du taux de kaolin sur le début de prise du ciment élaboré ;
- Des essais relatifs à l'effet du taux de kaolin sur la résistance à la compression du ciment élaboré à l'âge de 28 jours.

A part les essais de caractérisation, tous les autres ont été réalisés avec des taux variable de kaolin (0 - 5 - 10 et 15%) en substitution massique du ciment.

Les principaux résultats sont résumés dans ce qui suit :

- ✓ La M_v du kaolin ($M_v = 980 \text{ kg/m}^3$) est comparable à celle du ciment portland ($M_v = 1000 \text{ à } 1100 \text{ kg/m}^3$) et justifie donc sa substitution massique.
- ✓ La courbe granulométrique du sable (de granularité 0/2) est continue et justifie son utilisation dans la confection des mortiers d'étude.
- ✓ Le ciment composé avec du kaolin est un matériau plus avide en eau que le ciment sans. Plus on augmente le taux de substitution du ciment par le kaolin, plus la quantité d'eau de gâchage devient plus importante (pour une même consistance normale).
- ✓ L'incorporation du kaolin accélère le début de prise du ciment composé. Le gain de temps est de l'ordre de 20 % lorsque 15% de kaolin sont incorporés.
- ✓ La R_{c28} du ciment (obtenue expérimentalement sur mortier de composition normalisée) est améliorée avec l'incorporation du kaolin. L'évolution est non linéaire et plus accentuée entre 0 et 5%. L'explication probable est liée à :
 - La finesse du kaolin plus importante que celle du ciment qui améliore la compacité du mélange et par conséquent sa résistance mécanique.
 - La pouzzolanité du kaolin qui peut être plus importante que celle du ciment (*Aneb L. et al, 2023*) et qui favorise mieux l'adhésion des grains de sable.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES D'AVENIR

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Ce travail nous a permis de découvrir les kaolins et de rassembler les connaissances qui les concernent dans un travail bibliographique exposé dans la première partie de ce mémoire. Ce sont des argiles blanches constituées chimiquement d'aluminates (Al_2O_3) et de silicates (SiO_2) et présentent morphologiquement une structure tubulaire et fibreuse.

En Algérie, il existe deux principaux gisements de Kaolin :

- Gisement de Tamazert (El Milia, wilaya de Jijel)
- Gisement de Djebel Debbagh (wilaya de Guelma)

Les kaolins ont des utilisations variées : dans la fabrication des céramiques, des émaux, des réfractaires, de la porcelaine, des éviers, dans le domaine médical et pharmaceutique, produits de beauté etc ...

Il a été montré par ailleurs, qu'ils peuvent être utilisés dans le domaine de la construction : confection des briques émaillées, tuiles blanches, faïences et dalles de sols.

Ils peuvent être traités thermiquement à de basses températures entre 500 et 900°C et le produit obtenu, le métakaolin (MK), présente des caractéristiques pouzzolaniques élevées permettant la fabrication des ciments composés écologiques.

L'utilisation du kaolin dans la fabrication des ciments blancs est particulièrement appréciée et avantageuse à cause de sa blancheur due à la forte teneur d'alumine.

L'étude de cas réalisée par Mansour et al. (*Mansour MS. et al., 2011*) et présentée dans ce mémoire, sur l'effet d'un kaolin local qui provient d'une carrière du gisement de Tamazert (El Milia, wilaya de Jijel) sur quelques propriétés d'un mortier normal a fait ressortir des résultats intéressants :

- 4- Le MK algérien utilisé améliore les résistances à la compression des mortiers lorsqu'il est utilisé aux taux de 10 et 20 % ;
- 5- Le MK incorporé dans le ciment peut entraîner une bonne résistance aux attaques acides, à tous les pourcentages de substitution, surtout aux attaques de l'acide sulfurique.

Le travail expérimental réalisé dans la seconde partie a permis les conclusions suivantes :

- ✓ Le ciment composé avec du kaolin est un matériau plus avide en eau que le ciment sans. Plus on augmente le taux de substitution du ciment par le kaolin, plus la quantité d'eau de gâchage devient plus importante (pour une même consistance normale).
- ✓ L'incorporation du kaolin accélère le début de prise du ciment composé. Le gain de temps est de l'ordre de 20 % lorsque 15% de kaolin sont incorporés.
- ✓ La résistance à la compression à 28 jours du ciment (obtenue expérimentalement sur mortier de composition normalisée) est améliorée avec l'incorporation du kaolin. L'évolution est plus accentuée entre 0 et 5%. L'explication probable est liée à :
 - La finesse du kaolin plus importante que celle du ciment, qui améliore la compacité du mélange et par conséquent la résistance mécanique.
 - La pouzzolanité du kaolin qui peut être plus importante que celle du ciment (**Aneb L. et al, 2023**) et qui favorise mieux l'adhésion des grains de sable.

Pour les perspectives d'avenir, il serait intéressant de compléter le programme expérimental entamé et décrit dans ce mémoire puis d'envisager d'autres taux de substitution du clinker par le Métakaolin afin d'élargir le champ de cette recherche.

Il serait intéressant également de réaliser des études de microstructure pour apprécier la diminution de la porosité de la matrice due à la finesse du kaolin.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ambroise J., Murat M., Pera J.** «Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV. Experimental conditions for strength improvement on metakaolinite minicylinders» Cement and Concrete Research Volume 15, Issue 1, Pages 83-88, January 1985.
- Aneb L. et Benbournan S.** « *Evaluation de l'activité pouzzolanique du métakaolin : Cas des mortiers à base cimentaire* » Mémoire de master chimie Université M'hamed Bougara de Boumerdès, juillet 2023.
- Barkat A.** « *Etude de l'influence de la finesse du métakaolin sur les mortiers à hautes performances* ». Mémoire master en génie civil. Université Saad DAHLEB Blida, 2020.
- Benaiche L.** « *Valorisation du Kaolin pour la synthèse des Géopolymères : Etude bibliographique* » Mémoire de Master, Université de Guelma, Septembre 2020.
- Berraih M.** : " *Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre*". Mémoire de magister en génie civil - ENSET d'Oran, 2010.
- Bouyoucef A., Boukheit N., Hamamda S.** « *Caractérisation de la kaolinite et du mica dans un kaolin enrichi* » Sciences & Technology. Vol. 31, 20-25. 2010.
- Bouazza F.** « *Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées* » mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, université abou bekr belkaid–Tlemcen, 2012.
- Boukoffa M., Bouabsa L., Lamouri B., Fagel N.** « *Evaluation des indices d'altération chimique sur un profil kaolinisé, cas de Tamazert (Algérie)* » Courrier du Savoir – N°23, Juin 2017, pp.95-100
- Boussouf L.** « *Synthèse et Caractérisations d'une Céramique Electrotechnique du type : $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - \text{SiO}_2$* » mémoire magister, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2009.
- Bouzidi N.** « *Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson* ». Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2012.
- Caillère S., Hénin S., Rautureau M.** « *Minéralogie des argiles. 1, Structure et propriétés physico-chimiques* » Edition Masson, 1982.

- Charles N., Colin S., Gutierrez T., Lefebvre G.** « *Kaolin et argiles kaoliniques Mémento* » RGM/RP-67334-FR–Rapport final, Février 2018.
<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67334>.
- Cheknoun R., Rabia H.** « *Valorisation du kaolin de Tamazert pour les besoins de la céramique* » mémoire d'ingénieur en Génie Minier, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2015.
- Chouafa M.** « *Comportement du Kaolin à l'enrichissement par flottation. Cas de la mine de Tamazert – Jijel* » Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2016.
- Gillott J.E.** "Clay Mineralogy in Engineering Geology, Industry and Agriculture". Edited by J.E. Gillott. Pages 187-308 (August 1987)
- Khaoui S.** « *Analyse ATD de la cinétique de formation de mullite dans une mélange Kaolin phosphate naturel* » mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 28 juin 2022.
- Kolli M.** "Elaboration and characterization of a refractory based on Algerian kaolin", *Ceramics international* N° 33, 2007, pp 1435–1443.
- Lachter B., Khan M. S.** « *Kaolin DD₃ de Djebel Debagh Guelma : Caractérisation et utilisation dans l'élaboration d'un ciment composé* » Mémoire de Master, Université de Guelma, 2020.
- Laraba M.** « *Caractérisation physico-chimique et valorisation du minerai de kaolin de Djebel Debagh - Guelma en vue de son utilisation industrielle* » thèse doctorat en génie des matériaux, université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel, 2022.
- Lietand O.** « *Contribution à l'étude physico-chimique cristallographique et morphologique des kaolins* » thèse de doctorat, université de Nancy, France.1977.
- Madaci I., Zelmati M.** « *Elaboration et caractérisation d'une céramique technique à base d'alumine Al₂O₃* », mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2018.
- Mansour M.S, Kenai S., Ghrici M, Kadri EH.** « *Properties of mortars with algerian metakaolin* ». International conference on durability of building materials and components. Porto-Portugal. April 12 – 15th, 2011.
- Measson M.** « *Étude de l'activité pouzzolanique de matériaux naturels traités thermiquement, en vue de la réalisation de liants hydrauliques* ». Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1981.

- Megdoud Y.** "*L'effet combiné du kaolin et des déchets de céramique dans la formulation des mortiers*". Mémoire de master académique en génie civil. Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2023.
- Messi A.** «*Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborés à partir de latérites actives thermiquement*». Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 1988, 256p.
- Mokhtar M. et Oukil A.** " *Comportement des mortiers confectionnés par le Métakaolin* " Mémoire de Master en Génie Civil. Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2016.
- Mountoumnjou O.** « *Elaboration des grès céramiques à base d'argiles kaoliniques de koutaba et des matériaux feldspathiques de Dschang : effet de la vitesse de cuisson* » Mémoire du Diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire en Chimie inorganique, Université Yaoundé I du Cameroun, 2016.
- Pera, J.** "*Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete*"; Cement and Concrete Composites 23:441-454. 2001.
- Rabehi B.** « *Evaluation des propriétés réfractaires et cimentaires du kaolin de Djebel Debbagh* » Thèse de Doctorat, université M'hamed bougara-Boumerdes, 2013.
- Ramezaniapour A., Bahramijovein H.,** «*Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes*», Construction and Building Materials, vol 30, 2012, p. 470 - 479.
- Raphaël B.** «*Vers une utilisation rationnelle des métakaolins flash : application aux bétons. Matériaux composites et construction*». Thèse de doctorat en génie civil. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015.
- Salhi K.** «*Performance des mortiers et bétons à base des ciments contenant du métakaolin algérien*». Doctoral thesis, Université Mohamed Khider – Biskra.2021.
- Schreier , Ré. E.** "*Minéralogie argileuse*". McGraw-Hill, New York, 2nd. Edition. 1968.
- Talbi. F** «*Etude des phénomènes de conduction et de rupture diélectrique dans les céramiques à haute teneur en alumine*». Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- Yettou A. et Mammeri O.** "*Effet des additions minérales sur la durabilité des bétons*". Mémoire de Master en Génie civil Spécialité : Matériaux. Université Saad Dahleb Blida 2019.
- Ulrich F.** " *Elaboration et caractérisation d'un éco-ciment contenant le métakaolin/cendre de balle de riz et la poudre de verre* ". Mémoire de master en génie civil. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement Institut 2iE, 2022.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche technique du ciment marque matine Lafarge Algérie

Annexe 2 : Fiche technique du kaolin A130S

Annexe 3 : Etude de cas article « Properties of mortars with algerian metakaolin» (*Mansour M.S et al. 2011*).

Annexe 4 : Glossaire « Kaolin – céramique et éco-ciment »

ALGÉRIE



ماتين MATINE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES



- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE



	Ciment 	Sable (sec)  0/5	Gravillons (sec)  8/15mm 15/25mm		Eau (litres) 
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES



• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

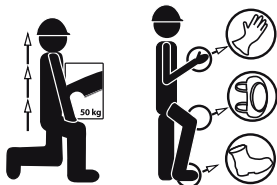
CONSIGNES DE SÉCURITÉ



1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

MEMBRE DE
HOLCIM



Conditionnement:



LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

LAFARGE
لافارج

Kaolin A130S

Analyse chimique (FRX):

SiO ₂	47,7%
Al ₂ O ₃	36,0%
Fe ₂ O ₃	1,0%
K ₂ O	1,2%
Na ₂ O	0,4%
MgO	0,3%
TiO ₂	0,3%
CaO	0,1%
P ₂ O ₅	0,1%
L.O.I.	12,7%

Analyse Granulometrique

	Mastersizer	Sedigraph
< 2 µm	20.0%	62.0%
D 50	10.0µ	2.1µ

Refus (accumulées):

> 45 µm	1.0%
> 63 µm	0.3%

Résistance à la rupture à sec 110°C (éprouvettes extrudées):

18 Kg cm⁻²

Humidité typique:

Granulée 18 ± 2%

Propriétés physiques calciné

Température	1185 °C
Retrait	7.0%
Absorption d'eau	12.0%
Résistance à la rupture	410 Kg/cm ²
Blancheur	L* 94,0 a* 0,0 b* 7,0

Les résultats présentés sont des moyennes calculées sur notre expérience et devront être seulement considérés comme des valeurs indicatives.

2007.01

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259493809>

Properties of Mortars with Algerian Metakaolin

Conference Paper · January 2011

CITATIONS

0

READS

103

4 authors:



Mohamed Said-Mansour

Hassiba Benbouali University of Chlef

14 PUBLICATIONS 407 CITATIONS

SEE PROFILE



S. Kenai

Saad Dahlab University

111 PUBLICATIONS 2,362 CITATIONS

SEE PROFILE



Mohamed Ghrici

Hassiba Benbouali University of Chlef

77 PUBLICATIONS 790 CITATIONS

SEE PROFILE



El-Hadj Kadri

Université de Cergy-Pontoise

97 PUBLICATIONS 1,804 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Use of artificial neural networks for predicting the effect of sulfates on unconfined compressive strength of lime-stabilized clayey soils [View project](#)



the use of artificial neural networks for prediction of geotechnical properties [View project](#)

Properties of Mortars with Algerian Metakaolin

Mohamed Said-Mansour¹

Said Kenai²

Mohamed Ghrici³

El-Hadj Kadri⁴

ABSTRACT

In this study, Algerian kaolin was treated thermally at 850 °C during 3 hours to produce Metakaolin. Binders in which Portland cement was replaced by up to 30% of metakaolin were tested for (i) hydration heat, (ii) compressive strength up to 365 days and (iii) Durability tests by resistance to two acid solutions. The results show that under the chosen conditions, the tested Kaolin was transformed to an amorphous phase and the use of blended cements made with heat treated metakaolin enhances the hydration heat of mortars and improves the early age and the long-term compressive strength. Durability was also enhanced as better acidic resistance was observed.

KEYWORDS

Algerian kaolin, Calcinations, Hydration heat, Compressive strength, Acidic attack.

¹ Civil Engineering Department, University of Tiaret, ALGERIA, msaidmansour@gmail.com

² Geomaterials Laboratory, University of Blida, ALGERIA, sdkenai@yahoo.com

³ Civil Engineering Department, University of Chlef, ALGERIA, m_ghrici@yahoo.fr

⁴ L2MGC Laboratory, University of Cergy Pontoise, FRANCE, El-hadj.kadri@u-cergy.fr

1 INTRODUCTION

Metakaolin (MK) is produced from a natural and accessible resource through the calcinations of kaolinite within the temperature range of 650–900°C. Calcination transforms a crystallized, organized phase (kaolinite) into a disorganized phase (MK) through crystal lattice failure. The dehydroxylation and disorganization of the kaolinite generate a reactive material with high pozzolanic properties at ambient temperatures.

Pozzolanic materials with high pozzolanic activity, such as MK, react with calcium hydroxide released in the hydration of ordinary Portland cement (OPC), increasing the hydration heat due to exothermic effect of the pozzolanic reaction, compared to 100% OPC [Frías et al. 2000, Ambroise et al. 1994]. The acceleration in OPC hydration is also apparent in the observed increased rates of heat evolution temperature in OPC-MK system.

In the past, it was common to coat concrete vulnerable to deterioration by acid attack with an anticorrosion coating of a resin in order to prevent corrosion. However, in several cases where the coating is not sufficient, the problem of deterioration would surface just a few years after the coating. Therefore, there is an increasing trend to make the concrete itself resistant to acid attack.

Among the methods to improving the resistance to acid attacks is to use supplementary cement materials (SCMs) such as natural pozzolan [Ghrici et al. 2007], fly ash [Goyal et al. 2009], silica fume [Rahmani & Ramazanianpour 2008] and MK [Hewayde et al. 2007]. The improvement reported by the authors may be due to the denser and improved microstructure of concrete resulting from SCMs incorporation. Hewayde et al. [2007] reported that MK reduced the mass loss of concrete specimens due to immersion for eight weeks in H_2SO_4 . This is due to the formation of calcium aluminate hydrates (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} , C_3AH_6) in the MK-modified concrete. It is believed that calcium aluminate hydrates may be more chemically stable in highly acidic environments than calcium silicate hydrates.

In the light of the facts mentioned above, the main objective of this paper is to investigate the effects of Algerian metakaolin on the compressive strength, hydration heat and acidic attack resistance of mortars.

2 EXPERIMENTAL PROCEDURES

2.1 Materials used

The mixes constituents were ordinary Portland cement (OPC) CEM I 52.5, Algerian MK (obtained by heat treated of Algerian kaolin, from quarry of El-Milia in the East of Algeria, at 850 °C for 3 hours), water and standard sand (CEN EN 196-1). The superplasticizer (SP) used was polycarboxylate modified based liquid with 80% water and density of 1.07 g/cm³. Composition and properties of OPC and MK are given in Table 1.

2.2 Mixes used

The mortar mixes had proportions of 1binder: 3 Sand. The binder consisted of cement and MK. The cement was formulated varying the replacement of MK from 0% to 30%. All replacements were made by mass. The water:binder (w/b) ratio was kept constant at 0.5. SP was added to obtain a flow time of mortar of about 10 ± 1 secondes. Table 2 shows the combination of blended cements studied in the determination of strength of mortars.

Table 1. Chemical composition and properties of OPC and MK.

	OPC	MK
SiO ₂ (%)	20.23	55.50
Al ₂ O ₃ (%)	4.29	40.00
Fe ₂ O ₃ (%)	2.35	1.40
CaO (%)	63.67	0.08
MgO (%)	3.88	0.22
SO ₃ (%)	2.80	--
Na ₂ O (%)	0.14	0.09
K ₂ O (%)	0.69	0.71
TiO ₂ (%)	0.25	0.24
I. R (%)	0.39	--
L.O.I. (%)	1.63	1.00
CaCO ₃		
MgCO ₃		
Surface specific area (m ² /kg)	359.00	
Surface specific BET (m ² /g)		16.0
Initial time of set:	2h 45 min	
Final time of set:	4h 55 min	
Bogue composition of cement:		
C ₃ S: 66.90		
C ₂ S: 10.70		
C ₃ A: 8.40		
C ₄ AF: 7.60		

2.3 Specimen preparation, curing and testing

2.3.1 Compressive strength

Prismatic mortar specimens having 40x40x160 mm dimensions were used for the study of compressive strength. Specimens were cast in steel moulds and kept in a moist room at 20 °C for 24 h. Demoulding took place after that and specimens were placed in water at 20 °C for a total curing period of 365 days. Compressive strength was determined at 1, 7, 28, 90 and 365 days according to EN 196-1. The compressive strengths presented represent the average values obtained on three specimens.

Table 2. Mortar Mix proportions.

	Cement [g]	MK [g]	Sand [g]	W/B [%]	SP [%]
OPC	450	0	1350	0.5	0.0
10% MK	405	45	1350	0.5	0.3
20% MK	360	90	1350	0.5	0.5
30% MK	215	135	1350	0.5	0.9

2.3.2 Hydration heat

Hydration heat tests were applied according to NF EN 196-9 standard. The method is based on the Langavant Calorimeter. This semi-adiabatic method consists of quantifying the heat generated during cement hydration using a Dewar flask, or more exactly, a thermally isolated bottle. Since the exterior conditions are very influential, the test is carried out in a climatized room at 20 ± 2 °C.

The measurements were made over 6 days, since the heat increase is observed to be very low at later times, and also since the relative error of the measurement increases beyond that time. Using quasi-adiabatic calorimeter, the variation of the temperature of mortar with time was measured immediately after mixing. For each mixture, the heat flow was determined along with the temperature evolution of mortar. The hydration heat of mortar was the combination of the accumulated heat in the calorimeter and the heat dispersed in the environment. At time t , the hydration heat q by gram of binder (cement or cement + addition) is obtained by the formula:

$$q = \frac{C}{m_c} \cdot \Delta\theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \Delta\theta \cdot dt \quad (1)$$

where C is the total thermal capacity of the apparatus (J/°C), m_c is the cement or binder mass (g), $\Delta\theta$ is the mortar heating difference to the ambient temperature (°C), and α is the total calorimeter thermal loss coefficient (J/h °C).

2.3.3 Acidic attack

Resistance to acid attacks was conducted on mortar specimens by immersing in two solutions: 1% HCl and 2.5% H₂SO₄ and weight loss measured during a period of 225 days. The relative acid attack was determined in accordance with ASTM C-267. The mortars specimens were cured in water at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ for 30 days before being subjected to acid attack. Three specimen of each mortar mix were immersed in 2.5% sulfuric acid (H₂SO₄) or 1% hydrochloric acid (HCl). The attacked portions of the mortar specimens were cleaned with de-ionised water and the acid attack then was evaluated through measurement of the weight loss (WL) of the specimens and determined as follows:

$$WL(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

Where W_1 is the weight of the specimen before immersion and W_2 is the weight of the cleaned specimen after immersion. The solution was renewed every 15 days and the weight loss of the specimens measured.

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Heat of hydration

Figures 1 and 2 shows the temperature and the cumulative heat hydration cumulative heat hydration for 6 days respectively. According to Fig. 1, the OPC mortar gives the maximum temperature at about 18 hours, after that, a 10% substitution of Portland cement by MK gives a greater temperature released as compared with the concrete without MK. On the contrary a 30% substitution of cement gives a lower temperature. Fig. 2 shows the total hydration heat (J/g of binder) for the four mortars. In this case, the 10% MK mortar produces the highest hydration heat, followed by OPC and 20% MK mortars. 30% MK mortar gives a lower total hydration heat.

The reaction of MK with CH and H₂O (H) contributes to the cumulative heat development by the hydrating systems, to the extent that with increasing MK content (up to a specific limit) the total heat evolved is greater than that from 100% OPC. However the MK-CH-H reaction is controlled by the availability of CH which itself is provided by the hydrating OPC. Thus, as the proportion of MK increases and that of OPC decreases, the supply of CH from the hydrating OPC will decrease but the demand for CH, from the increasing proportion of MK, will increase. Hence there will be a limiting MK-OPC ratio above which the reaction of MK with CH will be deficient due to insufficient supply

of CH. This will decrease the rate of heat output and thus the maximum hydration heat reached by the PC-MK mortar.

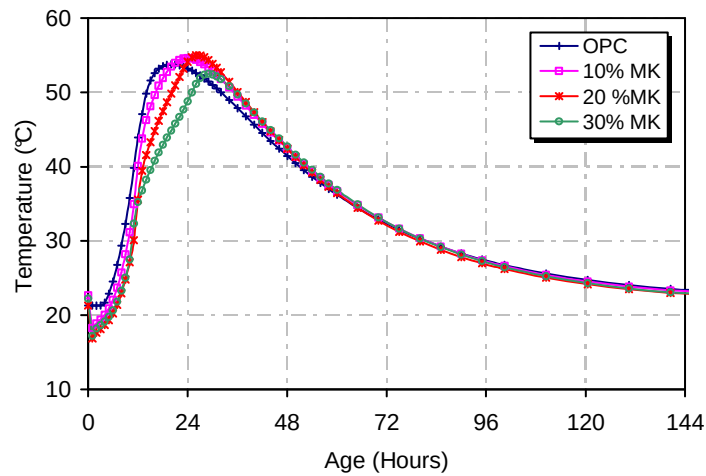


Figure 1. Effect of replacing cement with MK on the temperature profile.

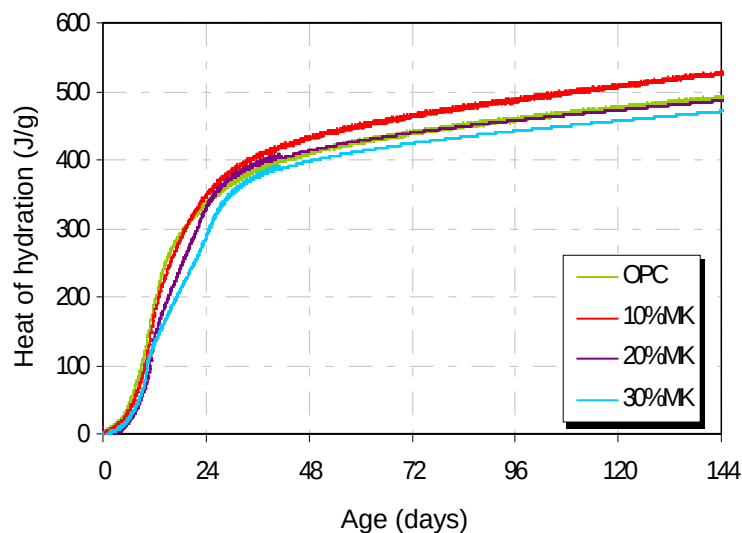


Figure 2. Cumulative heat hydration vs. time for mortar samples.

3.2 Compressive strength

The compressive strengths vs. curing time are reported in Fig. 3. The spread of the data at earlier ages (7 days) can be readily seen. The substitution of cement by 10% MK in mortar specimen gave a faster strength development than OPC mortar. After 365 days of curing, the mortar specimens with 10 and 20% MK presented a higher compressive strength than that of OPC mortar.

Figure 4 presents the relative strength versus curing time. The relative strength is the ratio of the strength of the MK mortar to the strength of OPC mortar at each particular curing time. The incorporation of 10 and 20% MK is particularly useful during the first 28 days, where the rate of strength development is considerably higher than the control. After 28 days of curing, the incorporation of MK does not cause an increase in the rate of strength development.

According to Wild et al. [1996], there are three elementary factors influencing the contribution that MK makes to compressive strength when it partially replaces cement in concrete. These are (i) the filler effect, which results in more efficient paste packing, is immediate, (ii) the acceleration of OPC hydration which has maximum impact within the first 24 hours and (iii) the pozzolanic reaction of MK with CH which makes the greatest contribution to strength somewhere between 7 and 14 days of age.

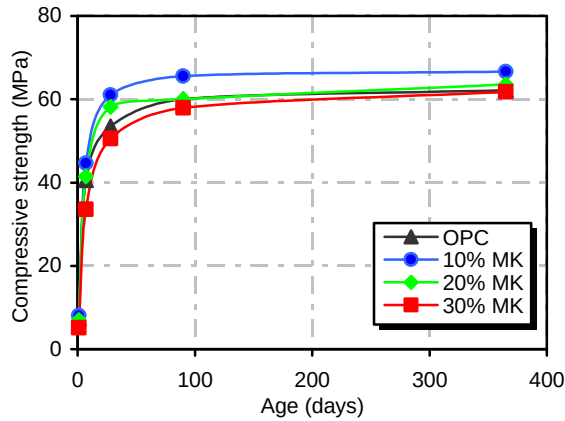


Figure 3. Compressive strength vs. time for mortar samples.

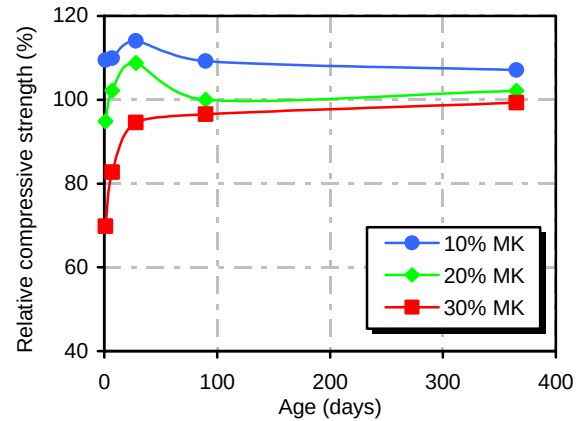


Figure 4. Relative compressive strength vs. time of mortars samples.

3.3 Durability

Figures 5 shows the test results of weight change versus time for mortar specimens exposed to 1% HCl and 2.5% H_2SO_4 solutions for 225 days, respectively. After 225 days exposure to 1% HCl solutions, the total loss in weight of OPC mortar was 25%. When the replacement level of cement is 10, 20 and 30% of MK, the loss in weight of mortar specimens was 17, 16 and 12% respectively.

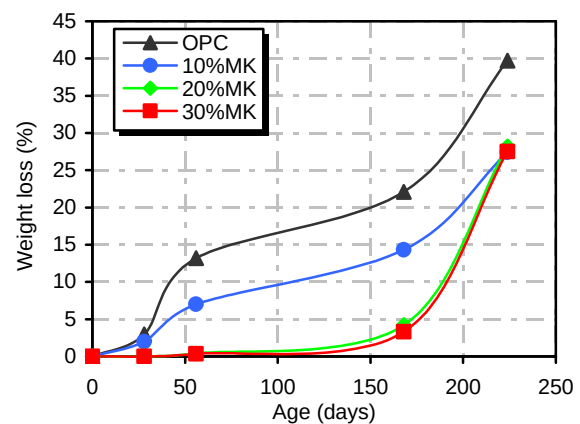
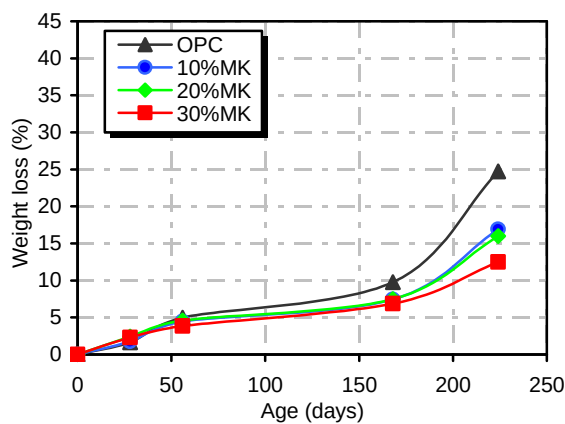


Figure 5. Weight loss for mortar specimens immersed in (a) 1% HCl and (b) 2.5% H_2SO_4 .

After 225 days exposure to 2.5% H_2SO_4 solutions, the total loss in weight of OPC mortar was about 40%. When the replacement level of cement is 10, 20 and 30% of MK the loss in weight of the three mortar specimens was 28%.

As a result, it can be concluded that MK can be used to improve the acid resistance of OPC mortar. According to Hewadey et al. [2007] this is due to the creation of calcium aluminate hydrates

(C_2ASH_8 , C_4AH_{13} , C_3AH_6) in the MK-modified mortar. These hydrates are chemically stable in highly acidic environments than calcium silicate hydrates (C-S-H).

Goyal et al. [Goyal et al. 2009] studied the effect of an aggressive chemical environment on concrete prepared with ordinary Portland cement and silica fume. The adverse environmental conditions are simulated by using either 1% sulphuric acid, 1% hydrochloric acid or 1% nitric acid. The authors measured the mass loss and compressive strength for a period of one year. They found that the course of action of acid attack is dependent on the type of acid and solubility of the calcium salt formed. The presence of mineral admixtures was found to lower the detrimental effect of all types of acids on concrete.

4 CONCLUSIONS

Local kaolin has been thermally activated and used as a pozzolan in blended cement. This study leads to the following conclusions:

- Algerian MK is an active mineral admixture that could be used in cement concrete products. It has a good effect on the mechanical properties of cement mortars.
- The blended mortar with 10% MK can reach higher hydration heat with respect to OPC mortar. it would be preferable not to use MK concrete where hydration heat may be a problem, e.g. in mass elements where cracking is probable.
- Resistance to acid attack is higher for metakaolin cement mixes as compared to control ones.

REFERENCES

- Ambroise, J., Maximilien S. & Peara, J. 1994, 'Properties of Metakaolin Blended Cements', *Advanced Cement Based Materials*, 1, 161-168.
- Frías, M., de Rojas M.I.S & Cabrera, J. 2000, 'The Effect that the Pozzolanic Reaction of Metakaolin has on the Heat Evolution in Metakaolin-Cement Mortars', *Cement and Concrete Research*, 30[2], 209-216.
- Ghrichi, M., Kenai, S. & Said-Mansour, M. 2007, 'Mechanical Properties and Durability of Mortar and Concrete Containing Natural Pozzolana and Limestone blended cements ', *Cement and Concrete Composites*, 29[7], 542-549.
- Goyal, S., Kumar, M., Singh Sidhu, D., & Bhattacharjee, B. 2009, 'Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7[2], 273-283.
- Hewayde E., Nehdi M. L., Allouche E., & Nakhla G. 2007, 'Using concrete admixture for sulfuric acid resistance', *Proceeding of Institution of Civil Engineering, Construction Materials* 160, Issue CMI, 25-35.
- Rahmani, H. & Ramazanianpour, A. A. 2008, 'Effect of Binary Cement Replacement Materials on Sulfuric Acid Resistance of Dense Concretes', *Magazine of Concrete Research*, 60[2], 145-155.
- Wild, S., Khatib J.M & Jones, A. 1996, 'Relative Strength, Pozzolanic Activity and Cement Hydration in Superplasticizer Metakaolin Concrete', *Cement and Concrete Research*, 26[10], 1537-1544.

GLOSSAIRE RELATIF AU KAOLIN, CERAMIQUE ET ECO-CIMENTS

GLOSSARY RELATING TO KAOLIN, CERAMIC AND ECO-CEMENTS

قائمة المصطلحات المتعلقة بالكاولين السيراميك والأسمنت البيئي

FRANCAIS	ENGLISH	عربي
A		
Absorption Argile Apparent Addition Adhérence Altération Adjuvants	Absorption Clay Apparent Addition Adhesion Alteration Additives	إمتصاص الطين الظاهري الإضافة العضوية التغيير الإضافات
B		
Béton frais Béton durci Basalte Brique réfractaire Brique émaillé	Fresh concrete Hardened concrete Basalt Refractory brick Enamelled brick	الخرسانة الطرية الخرسانة الصلبة البازلت الطوب الحراري طوب مطلي بالمينا
C		
Céramique Calcination Carbone Carbone organique Caractéristiques physiques Caractéristiques géométriques Caractéristiques mécaniques Concassage Criblage Calcaire Contraction Charge électrique Ciment Chaleur Consolidation Corrosion Conducteur d'électricité Conducteur de chaleur Composées heteropolaires Chlore Concentration critique Cohésion en cru Comportement dilatométrique	Ceramics Calcination Carbon Organic carbon Physical characteristics (features) Geometrical characteristics Mechanical characteristics Crushing Screening Limestone Contraction Electric charge Cement Heat Consolidation Corrosion Electricity conductor Heat conductor Heteropolar compounds Chlorine Critical concentration Raw cohesion Dilatometric behavior	السيراميك التكلس الفحم (الكربون) الكربون العضوي الخصائص الفيزيائية الخصائص الهندسية الخصائص الميكانيكية تكسير غربلة الحجر الجيري الاتكماش الشحن الكهربائي الإسمنت الحرارة التماسك التآكل موصل الكهرباء موصل حراري مركبات متغايرة الأقطاب الكلور التركيز الحرج التماسك الخام سلوك التماسك الخام

Chocs thermiques Carrelage Coulis Clinker Cendres volantes Cuisson	Thermal shock Tiling Grout Clinker Fly ash Firing	الصدمة الحرارية التبليط الجص الكلنكر الرماد المتطاير الحرق
D		
Densité Durabilité Dureté Défaillance diélectrique Déformation pyroplastique Décoffrage Dioxyde de silicium exothermique	Density Durability Hardness Dielectric failure Pyroplastic deformation Form release Exothermic silicon dioxide	كثافة ديمومة الصلابة الفشل العازل تشوه البلاستيك الحراري إطلاق الشكل ثاني أكسيد السيليكون الطارد للحرارة
E		
Eco-ciment Eco-béton Ecologique Eau de gâchage Environnement Enrobé Eprouvette Elasticité Elastomère Enduit Echange d'ions Echantillon Eléments traces Eviers	Eco-cement Eco-concrete Eco-friendly Mixing water Environment Coating Specimen Elasticity Elastomer – Rubber – Coating Ion exchange Sample Trace elements Sinks	الأسمنت البيئي خرسانة بيئية مواد صديقة للبيئة ماء المزيج أو الخليط البيئة تغليف – أسفلت – عينة مرونة المطاط الصناعي – الاستומר – تغليف التبادل الأيوني العينة العناصر النزرة الأحواض
F		
Fabrication Fibre Fines Fumée de silice Feldspath Fusion Flexibilité Frittage Faïence Façonnage Fissuration Fumée de silice Formulation Fragilité	Manufacture Fiber Fines Silica fume Feldspar Fusion Flexibility Sintering Earthenware Shaping Cracking Silica fume Formulation Weakness	صناعة – إنتاج ألياف جسيمات رقيقة رماد السيليكا الفلسبار الانصهار المرونة التليد الأواني الفخارية التشطيب التكسير دخان السيليكا التركيبية الهشاشة

G		
Gonflement Grès Granite Gypse Granulats	Swelling Sandstone Granit Gypsum Aggregates	الانتفاخ حجر رملي الجرانيت الجبس الركام
H		
Hydrates	Hydrates	المرطبات
I		
Industrie Imperméable	Industry Waterproof	الصناعة مقاوم للماء
K		
Kaolin Kaolinite	Kaolin Kaolinite	الطين الأبيض الكولين
L		
Liant Laitier vérifié Laitier de haut fourneau	Binder Vitrified slag Blast furnace slag	رابط خبث مزجج خبث الأفران العالية
M		
Métakaolin Matières organiques Mise en œuvre Matériaux volcaniques Minéral Malaxage Masse volumique apparente Masse volumique absolue Matière première Mortier Mica Mise en forme Moulu de haute fourneau Maniabilité Module de rupture Module de finesse	Métakaolin Organic matter Implementation Volcanic materials Mineral (Inorganic) Mix Bulk density Absolute density Raw material Mortar Mica Shaping High furnace ground Handling Modulus of rupture Fineness modulus	مينكاولين المواد العضوية تنفيذ مواد بركانية معدي خلط كتلة حجمية ظاهرية كتلة حجمية مطلقة مادة أولية ملاط ميك التشكيل الفرن العالي الأرضي المناولة معامل التمزق معامل النعومة
O		
Oxyde ferrique Organique (matériau) Oxydation Ouvrabilité Ouvrage d'art Ossature	Ferric oxide Organic Oxidation Workability Structure Framework	أكسيد الحديد عضوي أكسدة قابلية التشغيل الهيكل الإطار

P		
Pouzzolane	Pozzolan	البوزولان
Porosité	Porosity	مسامية
Performance	Performance	أداء
Plasticité	Plasticity	لدونة
Pate de ciment	Cement paste	عجينة إسمنتية
Prise et durcissement	Setting and hardening	أخذ وتصلب
Préfabrication	Prefabrication	مسبق الصنع
Plâtre	Plaster	الجبس
Particules	Particles	الجسيمات
Produit grésé	Stoneware	الخزف الحجري
Porcelaine	Porcelain	الخزف
Q		
Quartz	Quartz	كوارتز
R		
Résistance	Resistance	المقاومة
Rapport eau/ciment	Water/cement ratio	نسبة ماء/إسمنت
Réfractaires	Refractories	الحراريات
Retrait	Shrinkage	الانكماش
S		
Sable	Sand	رمل
Silice	Silica	سيليك
Sanitaires	Sanitary	الصرف الصحي
Substitution	Substitution	الاستبدال
Stabilité rhéologique	Rheological stability	الثبات الانسيابي
Soufre	Sulfur	الكبريت
Sels solubles	Soluble salts	الأملاح القابلة للذوبان
T		
Teneur en eau	Water content	المحتوى المائي
Teneur en humidité	Moisture content	محتوى الرطوبة
Tuiles	Tiles	القرميد
U		
Usage	Use	استغلال
V		
Valorisation	Valorization	تثمين
Viscosité	Viscosity	لزوجة
Verre	Glass	زجاج
Vaisselle	Tableware	أدوات المائدة