

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



مختار

باجي

جامعة

عن

Faculté : Sciences de l'ingénieur
Département : Génie civil
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux du Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les propriétés des mortiers de chaux aériennes

Présenté par : OUKIL Seif Eddine

Encadrant : ALI-BOUCETTA Tahar

MCB

Université d'Annaba

Jury de Soutenance :

BEHIM Mourad	Pr	Université d'Annaba	Président
ALI-BOUCETTA Tahar	MCB	Université d'Annaba	Encadrant
MELAIS Fatma Zohra	MCB	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements



Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu le tout puissant, qui ma accordé la force, la santé et le courage de mener à terme ce travail.

Je tiens dans un premier temps remercier vivement notre promoteur Mr Tahar Ali - Boucetta, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion ainsi pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition durant la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Mr Behim Mourad d'avoir présidé le jury de notre soutenance et à Melle Melais Fatma Zohra d'avoir examiné notre travail.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, nos vifs remerciements.

RÉSUMÉ

AUTEURS	Seif Eddine OUKIL
TITRE	EFFET DE LA POUDRE DE VERRE ET DU MÉTAKAOLIN SUR LES PROPRIÉTÉS DES MORTIERS DE CHAUX AÉRIENNES
ENCADREUR	Mr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

La chaux est un matériau naturel qui a su continuer à travers les âges et les temps. Avec ses caractéristiques chimiques et physiques, plusieurs domaines trouvent leurs réponses. Son emploi dans le bâtiment comme mortier, enduit ou badigeon remonte à plusieurs millénaires, mais au cours de ses dernières années, elle s'est vue supplantée par le ciment, son successeur artificiel. Avec le développement des idées sur le patrimoine architectural et sa préservation, la chaux retrouve un nouveau souffle. Étant le matériau de base dans l'ancien bâti, elle possède des propriétés compatibles avec les exigences de la réhabilitation, et son usage apporte des avantages, que ce soit sur le côté constructif, esthétique, historique, ou encore environnemental. Le but de ce travail est d'étudier l'influence de la poudre de verre, et du métakaolin sur les caractéristiques à l'état frais et durci des mortiers de chaux.

Tous les matériaux utilisés sont locaux, la poudre de verre et le métakaolin ont substitués la chaux en cinq taux : 10, 15, 20, 25, et 30 %. Les onze formulations ont été caractérisés à l'état frais (consistance et temps de prise) ainsi, qu'à l'état durci (R_c , R_{fl} , absorption d'eau capillaire et carbonatation).

Les résultats de ce travail sont globalement positifs et prouvent la faisabilité de l'incorporation de la poudre de verre et du métakaolin dans les mortiers de réhabilitation à base de chaux aérienne. Ils montrent notamment une amélioration sensible de la prise par rapport au mortier de chaux de référence ainsi qu'une nette augmentation de la résistance. Une étude complémentaire sur la durabilité de ces mortiers est cependant nécessaire pour une évaluation totale.

Mots clés : Mortier, chaux aérienne, poudre de verre, métakaolin, réhabilitation.

ABSTRACT

AUTHORS Seif Eddine OUKIL
TITLE EFFECT OF GLASS POWDER AND METAKAOLIN ON THE PROPERTIES OF AIR LIME MORTARS
FRAMER Mr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

Lime is a natural material that has continued through the ages and times. With its chemical and physical characteristics, several domains find their answers. Its use in buildings as mortars, plaster or whitewash goes back several millennia, but during this last years, lime was supplanted by cement, its artificial successor. With the development of ideas on the architectural heritage and its preservation, lime finds new life. Being the basic material in the old frame, it has properties compatible with the requirements of the rehabilitation, and its use brings benefits, whether on the constructive, aesthetic, historical, and environmental side. The aim of this work is to study the influence of glass powder and metakaolin on the fresh and hardened characteristics of lime mortars

Raw materials used are local, glass powder and metakaolin were used in five rates: 10, 15, 20, 25, and 30 %. The eleventh compositions were characterized at fresh and hardened states: consistency, and setting time, then compressive and flexural strengths, water absorption by capillarity and carbonation.

The results of this work are generally positive and prove the feasibility of the incorporation of glass powder and metakaolin in the lime-based rehabilitation mortars. In particular, they show a significant improvement in setting compared to the reference lime mortar, as well as a clear increase in resistance. A further study on the durability of these mortars is however necessary for a total evaluation.

Keywords : Mortar, air lime, glass powder, metakaolin, rehabilitation.

AUTEURS	Seif Eddine OUKIL
TITRE	EFFET DE LA POUDRE DE VERRE ET DU MÉTAKAOLIN SUR LES PROPRIÉTÉS DES MORTIERS DE CHAUX AÉRIENNE
ENCADREUR	Mr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

الجير مادة طبيعية استمرت عبر العصور و الأوقات , نظرا لخصائصه خصائصه الكيميائية و الفيزيائية ,العديد من المجالات تجد جواب لتساؤلاتها, يعود استعماله في المبنى كملاط , جص او تبيض منذ عدة آلاف السنين , و لكن خلال سنواته الأخيرة , تم استبداله بالاسمنت , خليفته المصطنعة . مع تطور الأفكار حول التراث المعماري والحفاظ عليه , تم إحياء استعمال الجير. كونه المادة الأساسية في المبنى القديم , فانه يحتوي على خصائص متوافقة مع متطلبات تقنيات تأهيل البنيات القديمة , واستخدمه يجلب فوائد, سواء على الجانب الشكلي للبناء أو الجانب الجمالي أو التاريخي أو حتى البيئي . الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير مسحوق الزجاج و الميتاكاولان على الخصائص الطازجة والصلبة لملاط الجيري .

جميع المواد المستخدمة محلية, و مسحوق زجاجي ميتاكاولان في الملاط الجيري في خمس نسب: 10 % ، 15 % ، 20 % ، 25 % ، و 30 % . تم تحديد خصائص التركيبات الإحدى عشر في الحالة الطازجة (الاتساق ، وقت الإعداد ،) وكذلك في الحالة الصلبة , (R_{fl} ، R_c ، امتصاص الماء عن طريق الخاصية الشعرية، و كربونات) .

نتائج هذا العمل بشكل عام إيجابية وثبتت إمكانية مسحوق الزجاج والميتاكاولان في ملاط المعالجة بالجير. على وجه الخصوص، فإنها تظهر تحسنا ملحوظا في الإعداد مقارنة مع الملاط الجير المرجعي , وكذلك زيادة واضحة في المقاومة. ومع ذلك ، فإن إجراء مزيد من الدراسة حول صلابة هذا الملاط ضروري لإجراء تقييم كلي.

الكلمات المفتاحية : الملاط ، الجير ، مسحوق الزجاج ، ميتاكاولان ، ترميم

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Table des matières	iv
Table des figures	vii
Liste des tableaux	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2

CHAPITRE I

MORTIERS DE CHAUX AÉRIENNES ; REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION	7
2. HISTORIQUE SUR LES MORTIERS DE CHAUX	7
3. LA CHAUX	8
3.1. Définition de la chaux	8
3.2. Les différents types de chaux	10
3.3. Fabrication de la chaux	11
3.4. Les fours à chaux.....	12
4. POUDRE DE VERRE À BOUTEILLES	14
4.1. Définition de la poudre de verre.....	14
4.2. Effet pouzzolanique de la poudre de verre.....	15
5. MÉTAKAOLIN	16
1.1. Définition du métakaolin.....	16
1.2. Effet pouzzolanique du métakaolin.....	17
6. LES CARACTERISTIQUES DES MORTIERS DE CHAUX	18
7. CONCLUSION	18

CHAPITRE II

MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

1. INTRODUCTION	22
2. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS	22
2.1. La chaux	22
2.2. La poudre de verre.....	23
2.3. Le métakaolin	24
2.4. Le sable	25
2.5. L'eau de gâchage.....	26
3. MÉTHODE DE FORMULATION DES MORTIERS DE CHAUX	27
3.1. Procédure de formulation	27
3.2. Préparation de la gâchée.....	28
3.3. Conservation des éprouvettes.....	29
4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	29
4.1. Essai sur mortier frais.....	29
4.2. Essais sur mortier durci	31
5. CONCLUSION	34

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR MORTIERS DE CHAUX

1. INTRODUCTION	37
2. RÉSULTATS OBTENUS SUR MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS	37
2.1. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur la consistance	37
2.2. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les délais de prise	38
3. RÉSULTATS OBTENUS SUR MORTIERS À L'ÉTAT DURCIS	40
3.1. Résistance mécanique à la flexion par traction	40
3.2. Résistance mécanique à la compression.....	41
3.3. Absorption d'eau par capillarité	42
3.4. Suivie de la carbonatation	44
4. CONCLUSION	44

CONCLUSION GÉNÉRALE	46
----------------------------	----

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48
------------------------------------	----

ANNEXES

Annexe A : Fiche technique de la chaux.....	52
---	----

Table des figures

1.1	Le cycle de la chaux (Coutelas, 2005)	9
1.2	Représentation schématique d'un fours traditionnels	12
1.3	Schéma simplifié d'un fours à chaux vertical simple	13
1.4	Schéma simplifié d'un fours à chaux vertical à cycles alternés	13
1.5	Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif (Claude, 1994).....	14
2.1	Courbes granulométriques de la chaux	23
2.2	Poudre de verre.....	24
2.3	Diffractogramme du verre	24
2.4	Kaolin de Djebel Debbagh 3 (DD3)	24
2.5	Sable de dunes (0/2)	25
2.6	Courbes granulométriques du sable (0/2)	26
2.7	Exemple de détermination du dosage en eau du mortier témoin	27
2.8	Conservation des éprouvettes.....	29
2.9	Etalement à la table à secousses d'un mortier de chaux.....	30
2.10	Mesure de la masse volumique réelle	31
2.11	Détermination des délais de prise avec l'Appareil de Vicat	31
2.12	Essai de traction par flexion 3 points	32
2.13	Essai de Compression.....	32
2.14	Essai d'absorption d'eau par capillarité	33
2.15	Photographie d'un échantillon de mortier de chaux à base de 30 % de poudre de verre à 56 jours de maturation.....	34
3.1	Effet de la substitution de la chaux sur la demande en eau des mortiers : a- Poudre de verre et b- Métakaolin	38
3.2	Effet de la substitution de la chaux sur les délais de prise : a- Poudre de verre et b- Métakaolin	39
3.3	Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la flexion : a- Poudre de verre et b- Métakaolin	40
3.4	Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la compression : a- Poudre de verre et b- Métakaolin	42
3.5	Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers : a- Poudre de verre et b- Métakaolin	43

Liste des tableaux

2.1	Composition Chimique de la chaux en (%)	22
2.2	Caractéristiques physique de la chaux	22
2.3	Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de verre.....	23
2.4	Composition chimique et caractéristiques physiques du métakaolin.....	25
2.5	Caractéristiques physiques du sable	26
2.6	Analyse chimique du sable en (%)	26
2.7	Composition des mortiers d'étude.....	27
2.8	Plages de consistances des mortiers (NBN EN 1015-3, 2007)	30

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'époque de la préhistoire où l'homme vivait dans des grottes, jusqu'à nos jours où les constructions modernes atteignent des records de hauteur, les matériaux de constructions ont considérablement évolué. Mais certains matériaux traditionnels ont su garder une continuité à travers le temps. C'est le cas de la chaux, matériau ancien utilisé au cinquième millénaire avant J-C en badigeon puis utilisé avec succès par les Grecs et les Romains comme mortier pour bâtir, décorer et traiter les sols.

Aujourd'hui, ce matériau a été délaissé au profit du ciment, plus résistant certes, mais plus rigide et moins adapté aux travaux de réhabilitation et de restauration du vieux bâti.

Mais avec le développement des réflexions sur le patrimoine architectural, et les monuments historiques, la chaux s'est à nouveau imposée grâce à ses propriétés qui répondent aux caractéristiques du bâti ancien, permettant ainsi sa pérennité.

L'Algérie regorge d'un lot important de monuments historiques, de différentes époques transmettant le passage de chaque civilisation, et ces dernières années les opérations de préservation et de restauration se sont multipliées, pour y remédier aux nombreuses dégradations que subissent ce patrimoine.

Nous proposons dans ce travail de recherche, d'ordre expérimental, de valoriser la chaux, ce matériau écologique et authentique pour confectionner des mortiers d'enduit à base de chaux aérienne, de poudre de verre issue du recyclage des bouteilles en verre et du métakaolin.

L'Algérie est un pays en pleine croissance démographique, par conséquent il génère énormément de déchets domestiques, parmi ces déchets, que le système de recyclage a oubliés, les bouteilles de verre coloré. En effet, les estimations faites par les services du ministère de l'environnement font état de la possibilité de récupération de 50.000 tonnes/an de verre en Algérie. Cependant, en l'absence de circuit de collecte et de recyclage des bouteilles en verre, celles-ci sont jetées dans les bennes à ordures ou en décharges sauvages (en bord de mer, le long des routes et dans les espaces verts), sachant qu'une bouteille en verre met au moins 4.000 ans pour se dégrader.

Le kaolin de Djebel Debbagh (Guelma), ou kaolin DD est un kaolin nature, connu et exploité depuis presque un siècle, il est extrait d'un gisement situé à Djebel Debbagh dans la wilaya de Guelma (Algérie), ce gisement est de nature hydrothermal. Le Gisement de Djebel Debbagh s'étale sur une superficie de 391 km² avec un stock estimé à plus de 18 millions de tonnes. D'une manière générale, les différentes qualités du kaolin DD sont classifiées en trois catégories ou nuances selon la concentration des impuretés d'oxydes métalliques. Les trois argiles DD1, DD2 et DD3 se différencient par leurs couleurs, blanche grisâtes pour les argiles DD1 et DD2 et grise pour DD3.

La poudre de verre et le métakaolin issu du kaolin apporteront à l'éco-mortier élaboré le caractère pouzzolanique, hydraulique et activeront la prise et le durcissement. La problématique de notre travail est essayé d'améliorer les propriétés physico-mécaniques des

mortiers de chaux aérienne qui représentent un frein à leur pour leur développement. Pour y parvenir, une étude expérimentale a été réalisée et présentée dans ce mémoire qui comprend trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les mortiers d'enduits à base de chaux aérienne. On a abordé les différents aspects de la chaux pour ensuite s'intéresser à la poudre de verre et au métakaolin et leurs effets pouzzolaniques.

Le deuxième chapitre présente la caractérisation de l'ensemble des matériaux utilisés au cours de cette étude, la procédure adoptée pour la formulation des différents mortiers de chaux et enfin les méthodes expérimentales employées pour faire aboutir notre travail.

Le troisième et dernier chapitre est réservé aux résultats obtenus et à leur interprétation.

Et enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

CHAPITRE I

MORTIERS DE CHAUX AÉRIENNES ; REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

MORTIERS DE CHAUX AÉRIENNES ; REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce présent chapitre est une étude bibliographique, on y présente une étude détaillée sur les mortiers de chaux aérienne. On commence par un bref paragraphe historique sur les mortiers de chaux. On s'intéresse par la suite à la chaux, ses différents types, son mode de fabrication, ancienne et traditionnelle et ses techniques de cuissons. Dans la suite de ce chapitre on aborde aussi les additions qui vont faire l'objet de ce travail notamment la poudre de verre et le métakaolin.

Sommaire

1. INTRODUCTION	7
2. HISTORIQUE SUR LES MORTIERS DE CHAUX	7
3. LA CHAUX	8
3.1. Définition de la chaux.....	8
3.2. Les différents types de chaux	10
3.2.1. Les chaux aériennes	10
3.2.2. Les chaux hydrauliques.....	10
3.2.3. Les chaux dolomitiques (magnésiennes)	10
3.2.4. La chaux vive	11
3.3. Fabrication de la chaux	11
3.3.1. Fabrication traditionnelle	11
3.3.2. Fabrication industrielle	11
3.4. Les fours à chaux	12
3.4.1. Les fours traditionnels.....	12
3.4.2. Les fours verticaux.....	13
3.4.3. Les fours rotatifs	14
4. POUDRE DE VERRE À BOUTEILLES	14
4.1. Définition de la poudre de verre	14
4.2. Effet pouzzolanique de la poudre de verre	15

5. MÉTAKAOLIN	16
5.1. Définition du métakaolin	16
5.2. Effet pouzzolanique du métakaolin	17
6. LES CARACTERISTIQUES DES MORTIERS DE CHAUX	18
7. CONCLUSION	18

Chapitre I Mortiers de chaux aériennes ; revue bibliographique

1. INTRODUCTION

Les problématiques propres au génie civil, ou à l'art de l'ingénieur, sont multiples : l'énergie, l'eau, la pollution et la santé. Les ingénieurs ont apporté et continuent d'apporter une contribution indispensable avec la disposition de nouveaux cycles des matières premières, produits et procédés, tout en respectant les contraintes environnementales, sociales et économiques qui sont les trois principaux piliers du développement durable.

L'application de ce concept au domaine de la construction, suppose que le choix d'un matériau pour construire soit examiné non seulement au vu de ses performances et de son efficacité, mais aussi de sa disponibilité sur la planète, de son renouvellement, de la proximité de son origine, de l'énergie mise en jeu lors de son élaboration (énergie grise), de sa durée de vie, ainsi que l'éventuelle utilisation de différents déchets de matériaux non biodégradable tels que le verre, dont son utilisation dans les bétons a fait sujet de plusieurs recherches ses dernières années.

La chaux est un des plus vieux liants qui existent pour le mortier. Le mortier de chaux permet de lier des éléments de maçonnerie entre eux, tout autant que la réalisation d'enduit à la chaux, de chape de chaux, de peintures, etc.

Son utilisation a repris souffle dans les chantiers de réhabilitation, car c'est le matériau qui possède des propriétés compatibles avec les exigences de l'ancien bâti, et son usage apporte des avantages, que ce soit sur le côté constructif, esthétique, historique, ou encore environnemental.

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude bibliographique sur la chaux, la poudre de verre et le métakaolin. Ces trois matériaux sont les constituants de nos mortiers d'étude, et les connaissances exposées à travers cette bibliographie, nous permettront une meilleure élaboration et caractérisation des mortiers, ainsi qu'une future compréhension et interprétation des résultats obtenus.

2. HISTORIQUE SUR LES MORTIERS DE CHAUX

Les premiers mortiers étaient faits de boue ou d'argile. On utilisait ces matériaux en raison de leur disponibilité et de leur faible coût. Les Égyptiens utilisaient les mortiers de gypse pour lubrifier l'assise des grosses pierres qu'on déplaçait pour les mettre en place. Toutefois, ces matériaux n'étaient pas très efficaces en présence d'humidité élevée et d'eau.

On a découvert que la pierre calcaire, lorsque brûlée et combinée à de l'eau, produisait un matériau qui durcissait avec le temps. Le premier usage documenté de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 ans av. J.-C., alors que les Égyptiens

l'utilisaient pour plâtrer les pyramides. Le début de l'utilisation de la chaux dans les mortiers est vague. On sait par contre que l'Empire romain utilisait couramment la chaux dans les mortiers. Marcus Vitruvius Pollio, connu sous le nom de Vitruve, un architecte romain, donnait les grandes lignes pour la préparation des mortiers de chaux.

Les mortiers contenant uniquement de la chaux et du sable nécessitent du dioxyde de carbone contenu dans l'air pour se convertir et reprendre la forme de pierre calcaire et durcir. Les mortiers de sable et de chaux durcissent lentement et ne durcissent pas sous l'eau. Les Romains ont créé des mortiers hydrauliques qui contenaient de la chaux et des pouzzolanes tels que la poussière de brique et la cendre volcanique. Ces mortiers étaient destinés à des applications où la présence d'eau ne permettait pas une carbonatation adéquate du mortier. Des exemples de ce type d'application comprennent les citernes, les bassins de poissons et les aqueducs (McKee, 1973).

Les recherches se multiplièrent sur les procédés de cuisson de la chaux, sa nature, et surtout le secret de l'hydraulicité :

- En 1756, Smeaton effectue des recherches expérimentales sur le rôle de l'argile dans certains calcaires ;
- En 1787, Chaptal développe des expériences à partir de pouzzolanes artificielles, rentrant dans la composition des mortiers de chaux. Son but est de permettre la réalisation d'économies sur la construction d'ouvrages hydrauliques, en limitant l'importation de pouzzolanes naturelles ;
- Entre 1825 et 1860, Vicat publie de nombreux ouvrages sur la chaux hydraulique artificielle. Il étudie notamment l'influence de l'argile lors de la calcination des calcaires. Et après de nombreux travaux sur la calcination du calcaire provenant de l'ensemble du territoire, de l'étude de la silice, de l'alumine contenue dans le calcaire, de l'apport d'argile après calcination, la première usine à chaux hydraulique artificielle fabriquée par le procédé VICAT est construite en 1918 à Nemours (Seine-et-Marne) (Ayat, 2015).

3. LA CHAUX

3.1. Définition de la chaux

Le terme de chaux est générique. Il regroupe un grand nombre de produit, dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température de calcaire. La cuisson décompose le carbonate de calcium CaCO_3 qui est le principal constituant du calcaire, pour libérer le gaz carbonique CO_2 , et laisser la chaux vive CaO selon l'équation (1.1) :



La chaux vive CaO ne peut être utilisée directement, car son hydratation s'accompagne d'un gonflement inadmissible dans un ouvrage. Donc on procède à son hydratation de façon à ce que on obtienne une chaux éteinte Ca(OH)_2 , sous forme de poudre blanche, légèrement soluble dans l'eau, et présentant les propriétés d'un liant.

Dans le schéma ci-dessous on peut voir l'ensemble des transformations que subissent la pierre à chaux et la chaux dans la chaîne opératoire du mortier (Coutelas, 2005).

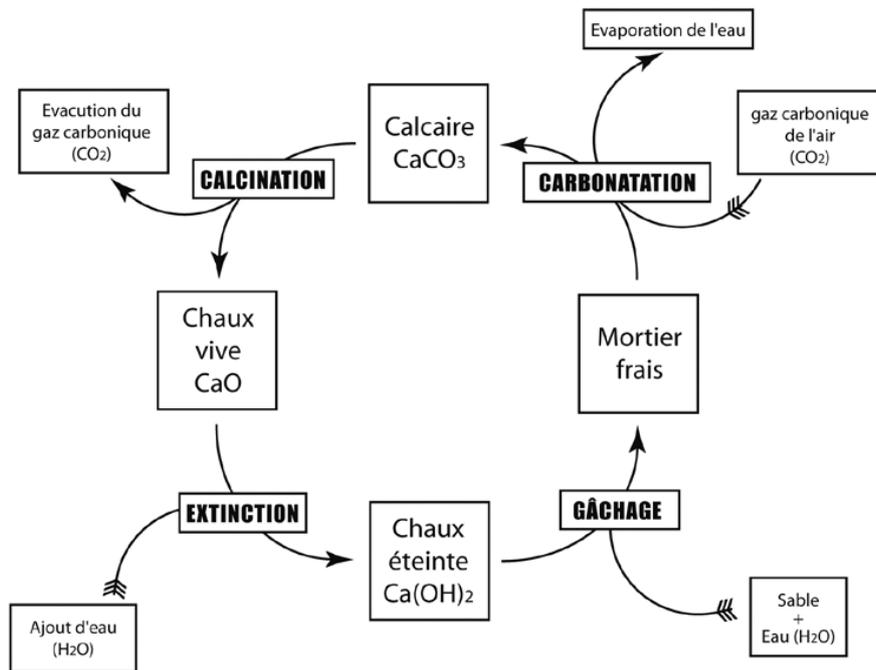


Figure 1.1. Le cycle de la chaux (Coutelas, 2005)

La **calcination** est la première étape du cycle de la chaux. La cuisson s'effectue à une température minimale de 830°C pour une pression d'atmosphère (pression atmosphérique normale). Pour un calcaire pur, il produit la réaction endothermique présentée par l'équation (1.2) :

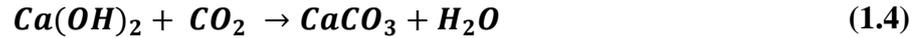


Il s'agit d'une réaction de décarbonatation. Le dégagement de dioxyde de carbone (CO_2) entraîne une perte de poids importante, jusqu'à 44 % de la masse initiale. Le volume est en revanche conservé. L'oxyde de calcium (CaO) restant est appelé « chaux vive ». Les chaux vives les plus réactives sont obtenues après calcination du calcaire à une température de 900°C .

L'**extinction** de la chaux vive est la deuxième étape du cycle de la chaux. Elle s'effectue par aspersion d'eau ou par immersion dans des bacs, est une réaction d'hydratation qui correspond à l'équation (1.3) :



La **carbonatation** est la dernière étape des transformations liées à la chaux. Elle intervient lorsque le mortier a été mis en œuvre et que la chaux est exposée au contact de l'air elle provoque alors le durcissement de la matière par reformation de calcite (Coutelas, 2005). C'est une étape lente, mais dont le bon déroulement déterminera par exemple la durée de vie d'un enduit. On peut modéliser cette dernière étape par l'équation (1.4) :



3.2. Les différents types de chaux

La fin du cycle de la chaux correspond à la réaction de carbonatation. Celle-ci dépend du type de chaux employé. La nature des constituants du calcaire, permet d'obtenir :

3.2.1. Les chaux aériennes

On obtient les chaux aériennes par la calcination d'un calcaire pure, ou qui contient un faible pourcentage d'argile (0 à 5 %). Les chaux grasse et maigre sont deux types de chaux aérienne, la chaux grasse tient son nom de l'onctuosité qu'elle procure au mortier, elle est très pure en carbonate (plus de 95 %) contrairement à la chaux maigre dont le taux d'argile atteint les 5 %.

Les chaux aériennes sont caractérisées par leur lenteur de prise. Cet inconvénient n'était pas considéré vraiment comme un handicap par les anciens bâtisseurs, car cette lenteur permettait par la plasticité des mortiers un tassement progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation, ainsi qu'une excellente répartition des pressions.

3.2.2. Les chaux hydrauliques

Lorsque le calcaire contient de l'argile (8 à 20%), la calcination donne lieu à la formation de silicates et d'aluminates de calcium, ce qui confèrent au liant un caractère hydraulique, et les chaux obtenues sont appelées chaux hydrauliques.

La prise des chaux hydrauliques se fait avec l'eau, sans air et même sous l'eau. Leur résistance mécanique est également remarquable par rapport à celle des chaux aériennes.

La qualité hydraulique d'un mortier est déterminée par l'indice de Vicat (indice d'hydraulicité). C'est le rapport entre différents composants associés à l'argile et la part en chaux, Le temps avant le début de la prise dépend directement de l'indice d'hydraulicité : plus celui-ci est élevé, plus rapide sera la prise.

Les propriétés des chaux hydrauliques n'étaient pas connues avant la fin du XVIIIe siècle. Les mortiers dits hydrauliques durant les périodes historiques ne correspondent pas à des mortiers de chaux hydraulique, mais à des mortiers de chaux aérienne mêlée avec un granulats réactif, « pouzzolanique »,

3.2.3. Les chaux dolomitiques (magnésiennes)

La calcination d'une roche calcaire contenant du carbonate de magnésium MgCO_3 , produit des chaux magnésiennes, contenant à la fois de l'oxyde de calcium CaO et de l'oxyde de magnésium MgO (magnésie). Ces chaux sont également appelées chaux dolomitiques.

Chaux dolomitiques et chaux hydrauliques naturelles peuvent, à l'égal des chaux aériennes, être soit vives, soit éteintes, selon qu'elles sont le produit direct de la calcination et contiennent donc des oxydes, ou qu'elles ensuite hydratées et contiennent alors des hydroxydes. La chaux hydraulique artificielle n'est pas considérée comme une chaux, car son obtention n'est pas par calcination de calcaire, mais par broyage et mélange de clinker de ciment et de matériaux inerte

3.2.4. La chaux vive

C'est la poudre qu'on obtient à la sortie du four. Elle n'est pas utilisable directement et est même **dangereuse**. En effet, quand mise en contact avec de l'eau, une réaction chimique puissante a lieu, libérant de grandes quantités de chaleur. Sa manipulation demande donc des précautions.

3.3. Fabrication de la chaux

3.3.1. Fabrication traditionnelle

Pour le chargement du four, le chafournier pénètre dans l'orifice inférieur, il dispose des blocs de calcaire de 2 à 3 kg, de façon à former une fausse voute et, au centre, il laisse une ouverture circulaire par laquelle passera et montera la flamme. Les pierres calcaires doivent être parfaitement calées car elles supportent toute la charge.

Si la voute est bien construite, elle ne s'effondrera pas pendant la cuisson ; en effet, la pierre, sous l'action de la chaleur, perd environ 44% de son poids, mais seulement entre 10 et 15 % de son volume (Ayat, 2015).

A la base du four, le chafournier pose autant de rangées de pierre que possible, les faces les plus grandes proches du feu, les faces les plus petites près des murs du four. Il remplit le four jusqu'à l'orifice supérieur, le ferme par une couche de pierres qui s'élève de 20 à 30 cm au-dessus du sol, et met le feu en marche à l'aide d'un bruleur.

La cuisson se poursuit pendant trois jours sans interruption, ou le chafournier surveille la couleur de la flamme : au départ, elle est bleutée, à cause du gaz carbonique qu'elle contient, mais elle rougit à la fin de la calcination. Il sait alors qu'il peut interrompre la cuisson.

Selon les textes classiques, la bonne chaux est légère et sonore : lorsqu'on la frappe avec un morceau de fer, elle émet un son qui rappelle celui d'une céramique bien cuite soumise à la même épreuve. Il faut laisser reposer la fournée, qui a perdu un peu plus d'un tiers de son poids, pendant deux à trois jours, pour qu'elle refroidisse lentement, en fermant les deux orifices du four.

3.3.2. Fabrication industrielle

La fabrication industrielle de la chaux consiste à transformer un matériau naturel (calcaire ou dolomie) en un produit aux multiples usages, avec des spécifications techniques différentes et adaptées à ces usages. Cette fabrication passe par des étapes. Une fois le site retenu, la première phase va de l'exploitation à la préparation de la roche à l'enfournement. La suivante concerne la calcination proprement dite de la pierre fragmentée dans des fours. La dernière permet l'élaboration et le conditionnement du produit final avant chargement pour expédition. La roche qui répond aux critères de fabrication est extraite du sol puis acheminée vers la chaîne de traitement pour être réduite aux dimensions souhaitées par le chafournier. Elle est généralement débarrassée des impuretés par criblage préalable (voie sèche) ou lavée si nécessaire et ne doit contenir qu'un minimum de particules fines. D'ailleurs, les particules de dimensions inférieures à 10 mm sont considérées comme « difficiles » à traiter en raison de

problèmes qu'elles occasionnent dans les fours, dont le colmatage. Elles peuvent être utilisées pour d'autres usages (agriculture, routes...)

3.4. Les fours à chaux

3.4.1. Les fours traditionnels

Les anciens fours à chaux étaient construits toujours à proximité des lieux d'approvisionnement en pierres comme en combustibles. Ils avaient généralement une forme tronconique, avec une hauteur de 5m, et un diamètre de 3m environ (Figure 1.2). Les parois intérieures étaient recouvertes d'argile, de briques ou de pierres réfractaires, qui servaient à conserver et à isoler thermiquement le four.

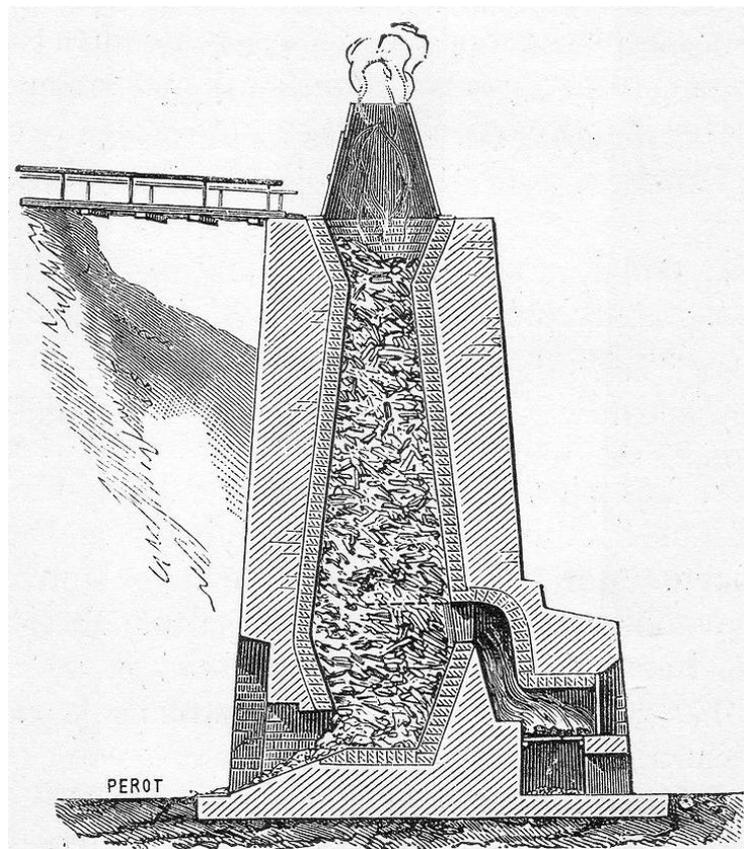


Figure 1.2. Représentation schématique d'un fours traditionnels

Un four à chaux est un réacteur dans lequel des morceaux de calcaire (ou de dolomie) sont portés, pendant une durée déterminée à une température appropriée, dépassant les 800°C. Le processus de cuisson paraît simple mais Il ne se déroule pas sans poser quelques problèmes car il faut traiter des tonnages importants et fabriquer un produit de très bonne qualité. Selon la granulométrie de la pierre mais aussi selon les usages industriels, deux catégories de fours sont utilisés : les fours verticaux et les fours rotatifs. Sans aborder les détails des processus mis en jeu lors de la cuisson (thermodynamique, cinétique des réactions, transformations minéralogiques...), les fours, dans l'une ou l'autre de ces catégories, comportent en simplifiant une zone de préchauffage, une zone de calcination et une zone de refroidissement (Bourezg, 2013). On retrouve une zonalité équivalente dans les fours rotatifs à ciments. Dans les installations modernes, la cuisson se fait en flamme continu.

Les parties exposées aux températures élevées sont généralement protégées par un garnissage de briques réfractaires dont la durée de vie est de 2 à 3 ans ; leur rôle est de protéger la virole métallique externe et de limiter les pertes de chaleur par rayonnement des parois. L'air réchauffé et les gaz de combustion circulent à contre-courant dans l'enceinte du four et assurent la décarbonatation du minerai. Toutes les opérations sont de nos jours entièrement automatisées ; des instruments de mesure, de contrôle et de régulation permettent de suivre à distance le bon fonctionnement de l'ensemble.

3.4.2. Les fours verticaux

Dans ces fours (Figure 1.3), la cuisson du calcaire (ou de la dolomie) s'effectue progressivement en descendant verticalement dans une enceinte cylindrique en acier intérieurement garnie de briques réfractaires. Ce calcaire rencontre un courant de gaz chaud (air + combustible) ascendant avec lequel s'opèrent des échanges thermiques dans les trois zones du four : celle du préchauffage dans la partie supérieure, celle de la décarbonatation dans la partie centrale et celle du refroidissement dans la partie inférieure de l'enceinte. Le CO₂ produit est évacué par l'air qui remonte vers la couche supérieure puis vers une cheminée de dépoussiérage. Enfin, lorsque le refroidissement est suffisant, la chaux est évacuée en partie basse. Cette extraction s'opère en simultané avec l'introduction d'une quantité équivalente de calcaire au sommet. Le temps de séjour moyen de la matière est de l'ordre de 24 heures.

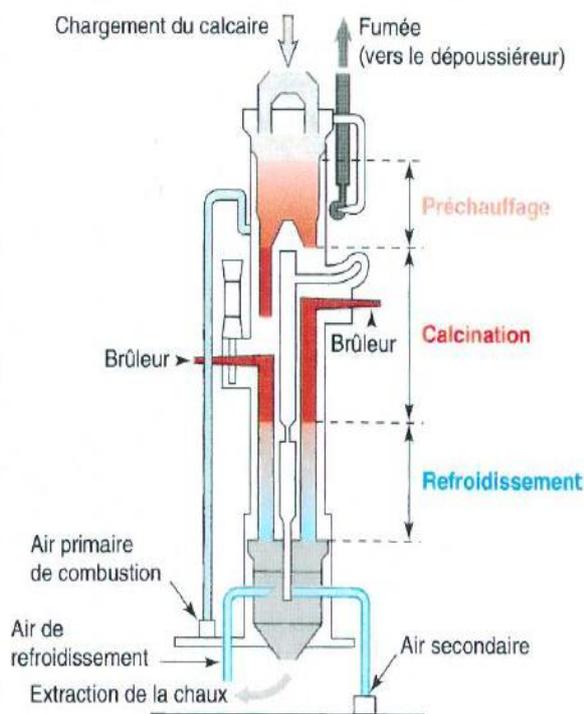


Figure 1.3. Schéma simplifié d'un four à chaux vertical simple

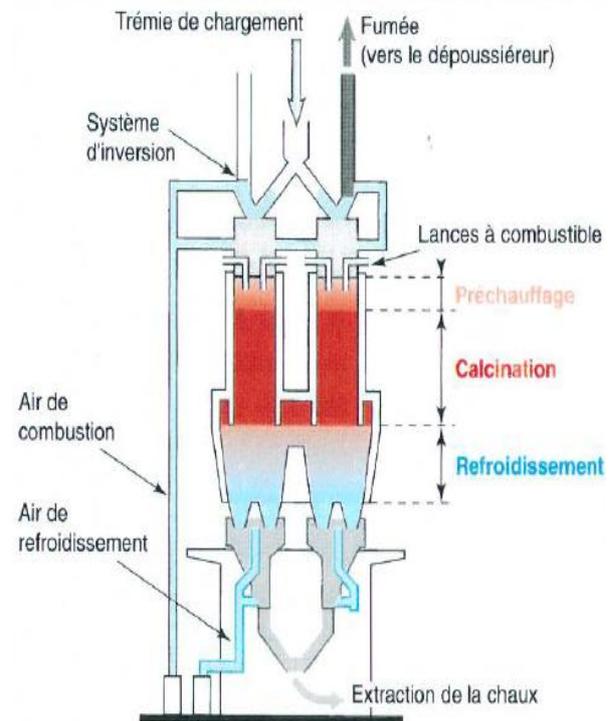


Figure 1.4. Schéma simplifié d'un four à chaux vertical à cycles alternés

Il convient de signaler l'existence de variantes à ces fours verticaux parmi lesquelles le four à cycles alternés (Figure 1.4) qui permet d'optimiser le rendement énergétique de la fabrication et de produire de grandes quantités grâce à la combinaison de deux fours verticaux fonctionnant alternativement. Après enfournement sur une cuve, la combustion se fait sur

l'autre permettant aux fumées de passer par le canal de liaison (ou « carneau ») et de préchauffer la pierre qui vient d'être enfournée. Ce procédé permet d'optimiser le rendement énergétique de la fabrication et de produire de grandes quantités de chaux vive.

3.4.3. Les fours rotatifs

Ils sont inspirés des fours servant à fabriquer du ciment, mais fonctionnant à des températures de l'ordre de 1000 à 1300° C (Figure 1.5). Leur principe de fonctionnement est assez proche de celui des fours verticaux, en ceci que le calcaire effectue un chemin inverse de celui du mélange air/combustible dans le four et diffère en cela que l'opération s'effectue presque horizontalement. Au niveau du préchauffage et du refroidissement des grilles tournant en boucle assurent l'avancée du calcaire et de la chaux ; au niveau de la combustion, une légère pente associée à la rotation du four garantit l'écoulement naturel de la chaux. L'air frais est soufflé par le bas, via des grilles situées au niveau du refroidisseur. Le temps de séjour y est de l'ordre de 6 à 8 heures pour des capacités de production de plus de 1500t/jours.

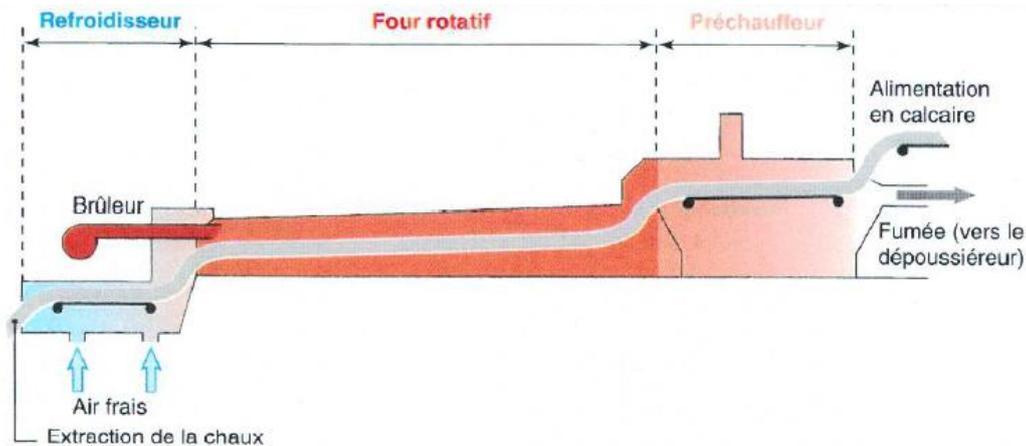


Figure 1.5. Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif (Claude, 1994)

4. POUDRE DE VERRE À BOUTEILLES

4.1. Définition de la poudre de verre

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. L'ingrédient de base est la silice (SiO_2) qui représente environ 68 à 74% de la masse et constitue l'élément formateur. Les fondants et les stabilisants sont constitués par (K_2O , Na_2O , CaO , MgO). La couleur du verre est obtenue en additionnant aux crus, certains oxydes métalliques. Ainsi, le Fe_2O_3 donne la couleur brune, le Cr_2O_3 la couleur verte, le CuO la couleur bleue, le MnO_2 la couleur rose, et le AgO la couleur jaune. Leur emploi dans le verre permet de diminuer la température de fusion et d'augmenter la durée de travail du verre lors du façonnage. Les proportions entre ces trois constituants vont dépendre en grande partie les caractéristiques d'un verre. On obtient par fusion entre 1400°C et 1500°C une masse visqueuse, amorphe, homogène et transparente, le verre.

Du fait de sa nature vitreuse et du contenu de certaines quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement (Idir, 2009). Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons.

Différentes études ont pu montrer que la couleur du verre, autrement dit sa composition chimique, joue un rôle conséquent sur les propriétés mécaniques de ce dernier. Des travaux réalisés par (Karamberi, 2005 ; Park *et al.*, 2004 et Sobolev *et al.*, 2007), affirment que le verre à base d'oxyde de fer (Fe_2O_3), est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique, derrière le verre à base d'oxyde de chrome (Cr_2O_3) puis le verre à base d'oxyde de plomb (PbO).

4.2. Effet pouzzolanique de la poudre de verre

La résistance en compression d'un béton dépend de la qualité du silicate de calcium hydraté (C-S-H) développé. L'ajout d'une addition pouzzolanique en remplacement partiel du ciment réagira avec la portlandite, ce qui résultera en la formation d'un nouveau C-S-H par réaction pouzzolanique ce qui comblera ainsi plus de vide et diminue la porosité améliorant ainsi la résistance en compression (Chekireb, 2015).

Une amélioration significative des propriétés mécaniques due à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre en substitution du ciment a été montrée par (Shao, 2000, Chen *et al.*, 2006). La substitution de 30 % de ciment par une poudre de verre dont le diamètre maximum des particules est de 38 μm a donné lieu à une activité pouzzolanique.

(Chen *et al.*, 2006) ont rapporté dans une étude, que l'utilisation de 40 % de poudre de verre dans le mortier augmente la résistance en compression de 20, 30 et 40 % à 28, 91 et 365 jours respectivement. (Shayan, 2006) montre que 20 % de remplacement de ciment Portland par une poudre de verre de finesse égale à 800 m^2/kg et de 10 % des granulats par la même poudre donnent des résistances similaires à celles d'un remplacement de 10 % de ciment par la fumée de silice. Il montre aussi que les 20 % de substitution de ciment donnent des résultats appréciables. L'amélioration de la résistance en compression dans certains mélanges à différents pourcentages est en fonction de la finesse et du mode de mûrissement (Shi *et al.*, 2005). D'une façon générale, l'augmentation de la résistance en compression a une influence sur les résistances en flexion, en traction et sur la ductilité du béton (Chekireb, 2009).

Les références citées dans ce paragraphe se rapportent à la valorisation de la poudre de verre dans des matériaux cimentaires. En effet, les études menées sur l'emploi de la poudre de verre dans les mortiers de chaux sont très peu. Sur l'ensemble des travaux quant à consulter dans la littérature, on peut citer les travaux de Fragata et al. (Fragata *et al.*, 2007) qui ont travaillé sur la poudre de verre provenant de déchets de verre plat dans des mortiers de chaux aérienne. Les auteurs rapportent que dans les mortiers de chaux, les résidus de verre agissent comme une addition pouzzolanique conférant une résistance mécanique accrue. Les auteurs expliquent cette amélioration des résistances mécanique par une réaction entre la poudre de verre et l'hydroxyde de calcium disponible dans les mortiers de chaux, produisant principalement des C-S-H similaire à ceux produites dans les réactions d'hydratation du ciment.

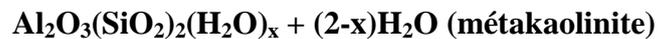
D'autres travaux ont été réalisés sur des enduits de chaux à base de poudre de verre (Cerny *et al.*, 2006). Les auteurs ont conclu à une amélioration positive des propriétés mécaniques, thermiques et hydriques des mortiers de chaux à base de poudre de verre qui ont été jugées comparables ou même meilleures que celle des mortiers de chaux classique.

Edwards et al. (Edwards *et al.*, 2007), on eux aussi étudié l'effet pouzzolanique de la poudre de verre dans des mortiers de chaux. Les auteurs confirment la présence d'un comportement pouzzolanique des résidus de verre lorsqu'ils sont incorporés à un mortier de chaux.

5. MÉTAKAOLIN

5.1. Définition du métakaolin

Les métakaolins sont obtenus par calcination d'argile kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures comprises entre 600 et 900 °C (Equation 1.1). La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin (autrement dénommé kaolinite) de l'argile kaolinique utilisée. La calcination entraîne la deshydroxylation et une destruction de la structure cristalline initiale du kaolin. Le composé formé est la métakaolinite (kaolinite calcinée). La durée du traitement thermique utilisée est couramment de cinq heures.



La métakaolinite est obtenue pour un taux de deshydroxylation du kaolin d'environ 88 %. Sa composition stœchiométrique est de type : $\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{SiO}_2)_2 (\text{H}_2\text{O})_{0,24}$. Selon le taux de pureté du kaolin initial, le métakaolin formé peut contenir d'autres phases mineures telles que de la silice ou de la muscovite.

Le métakaolin présente une réactivité pouzzolanique liée à son traitement thermique. En effet, Lima Souza et al. (Lima Souza *et al.*, 2005) affirment que c'est le processus de calcination des kaolins entre 500 et 800 °C qui confère essentiellement aux métakaolins leurs propriétés pouzzolaniques. Pour certains chercheurs (Poon et al. 2001), la haute réactivité initiale du métakaolin est attribuée à la phase aluminates qui favoriserait la formation de géhénite hydratée. De plus, Measson (Measson, 1981) et Ambroise et al. (Ambroise *et al.*, 1994) ont montré que parmi les argiles calcinées est la métakaolinite qui présente la plus forte pouzzolanité.

La réactivité pouzzolanique des métakaolin dépend de :

- leurs caractéristiques chimiques : composition chimique, composition minéralogique, degré de cristallinité ;
- de la pureté de la kaolinite initiale : les impuretés agissent comme des « diluants » ; Andriolo et al. (Andriolo *et al.*, 1985) relatent que la résistance mécanique de bétons incorporant des métakaolin diminue quand le taux d'impuretés dans les métakaolin augmente ;
- du processus thermique d'obtention : température de calcination, durée... ;
- de leur traitement post-calcination : broyage, désagglomération, tamisage... ;
- de la morphologie des particules obtenues : forme, degré d'agglomération, surface externe, surface totale, porosité intra-granulaire.

5.2. Effet pouzzolanique du métakaolin

Les matériaux possédant la faculté de se combiner avec l'hydroxyde de calcium produit par l'hydratation du ciment pour former des hydrates siliceux ou silico-alumineux aux propriétés liantes sont appelés « matériaux pouzzolaniques ».

Les réactions pouzzolaniques correspondent à un ensemble de réactions chimiques de dissolution-recristallisation en milieu aqueux favorisées lorsque le matériau possède une surface spécifique importante. Parmi les produits néoformés qui résultent de ces réactions, la majorité s'apparente aux silicates de calcium hydrates formés lors de l'hydratation des anhydres (C_2S et C_3S) composants le ciment, d'où leur appellation de « C-S-H secondaires ».

Poon et al. (Poon *et al.*, 2001) ont étudié la vitesse de réaction pouzzolanique dans des pâtes de ciment de type CEM I contenant des métakaolin, de la fumée de silice ou des cendres volantes en mesurant l'évolution de la résistance mécanique en compression et la diminution de la porosité. Toutes ces pâtes présentent un faible rapport E/C (0,3).

Les 7 premiers jours, c'est dans les pâtes contenant des métakaolins que la réaction pouzzolanique est la plus avancée (i.e. résistance mécanique la plus élevée et porosité la plus faible). La cinétique des réactions pouzzolaniques des métakaolins tend à diminuer après 28 jours : la résistance mécanique et la porosité évoluent peu. Les réactions pouzzolaniques perdurent au moins jusqu'à 90 jours puisque des variations des deux caractéristiques sont encore enregistrées à cette échéance. À ce moment, environ la moitié des métakaolins a réagi.

Là aussi, très peu d'étude ont été réalisées sur les métakaolins au sein des mortiers de chaux. Néanmoins, on peut citer les travaux de Aggelakopoulou et al. (Aggelakopoulou *et al.*, 2011), qui ont travaillé sur des mortiers de chaux et de métakaolin pour la restauration de maçonneries historiques. Les auteurs rapportent que tous les mortiers à base de métakaolins ont révélé des propriétés mécaniques et microstructurales comparables à celles des matériaux structuraux traditionnels. À mesure que le rapport métakaolin / chaux augmentait dans les mélanges, la perte de masse attribuée à la quantité totale d'eau liée des composés de la réaction pouzzolanique augmentait et les mortiers présentaient un déplacement net de la distribution de la taille des pores vers des pores plus étroits ($< 0,1 \mu\text{m}$) (Aggelakopoulou *et al.*, 2011). Les auteurs constatent aussi que la résistance mécanique des mortiers a atteint sa valeur maximale dans les 1 à 3 mois suivant le durcissement et la résistance est devenue stable. D'après les auteurs, cette perte de résistance mécanique pourrait être liée à la microfissuration due au retrait et à son rapport métakaolin / chaux.

Vavricuk et al. (Vavricuk *et al.*, 2018) ont étudié l'effet de la substitution de la chaux hydraulique naturelle par du métakaolin à des taux de 10, 20 et 30 % sur des coulis d'injection pour la réparation des maçonneries historiques. Les auteurs avancent que le métakaolin augmente les résistances à la compression et cela pour tous les âges considérés. Cette amélioration des résistances est proportionnelle aux taux de substitution. Les auteurs expliquent ces améliorations par le déclenchement des réactions pouzzolaniques.

6. LES CARACTERISTIQUES DES MORTIERS DE CHAUX

Les mortiers de chaux ont plusieurs qualités, on peut citer :

- La rétention d'eau : de nombreuses études ont démontré, grâce à des dispositifs spécifiques de filtration que ce sont les mortiers contenant de la chaux en pâte qui possèdent la plus grande capacité de rétention d'eau, ce qui confère aux mortiers une bonne plasticité,
- L'imperméabilité : les micropores des mortiers de chaux permettent à la vapeur d'eau de passer, contribuant ainsi à l'élimination de l'humidité,
- L'adhérence : c'est la valeur la plus importante pour un mortier, étant donné que les mortiers servent à souder les éléments entre eux. L'adhérence dépend en grande partie de la plasticité et de sa capacité de retenir l'eau.

7. CONCLUSION

Cette étude bibliographique a été réalisée dans le but de multiplier nos connaissances sur le mortier de chaux et l'effet de la poudre en verre et métakaolin sur ce dernier.

Le mortier de chaux est un matériau utilisé depuis longtemps, et que le témoignage de sa pérennité est présent jusqu'à nos jours dans les différentes constructions romaines.

Il existe plusieurs types de chaux (aérienne, hydraulique, dolomitique). La plus utilisée c'est la chaux aérienne qui est caractérisé par leur lenteur de prise ainsi qu'une excellente répartition des pressions.

Comme peu de gens pense a utilisé ces éléments nous avons pris l'initiative d'introduire la poudre de verre et le métakaolin dans les mortiers de chaux, d'un côté pour diminuer les déchets dans la nature et donc contribuer au développement durable afin d'économisé la matière première, et de l'autre afin d'améliorer les caractéristique physiques et mécaniques des mortiers de chaux grâce à l'effet pouzzolanique que possède la poudre de verre et le métakaolin.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX UTILISÉ ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE II

MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Le présent chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux qui seront employés dans cette étude. On présente également l'approche de formulation des mortiers qui a été choisie. Et pour finir, on présente les différentes méthodes expérimentales sur lesquelles va être basé ce travail expérimental afin d'aboutir l'effet de la substitution de la poudre de verre et du métakaolin sur les propriétés des mortiers de chaux.

Sommaire

1. INTRODUCTION	22
2. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS	22
2.1. La chaux.....	22
2.2. La poudre de verre	23
2.3. Le métakaolin	24
2.4. Le sable.....	25
2.5. L'eau de gâchage	26
3. MÉTHODE DE FORMULATION DES MORTIERS DE CHAUX	27
3.1. Procédure de formulation	27
3.2. Préparation de la gâchée	28
3.3. Conservation des éprouvettes	29
4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	29
4.1. Essai sur mortier frais	29
4.1.1. Essai d'étalement à la table à secousses.....	29
4.1.2. Masse volumique réelle	30
4.1.3. Délais de prises des mortiers de chaux	31
4.2. Essais sur mortier durci	31
4.2.1. Essai de traction par flexion.....	31

4.2.2. Essai de compression	32
4.2.3. Essai d'absorption d'eau par capillarité	32
4.2.4. Suivre de la carbonatation	33
5. CONCLUSION	34

Chapitre II Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection du mortier à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes et les modes opératoires en vigueur. La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un mortier joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures.

2. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. La chaux

La chaux employé dans cette étude est une chaux aérienne éteinte qui provient de l'usine Cevital Minerals d'El Khroub – Constantine, elle répond à la norme NF EN 459-1 (NF EN 459, 2012). Les différentes caractéristiques chimico-physiques de la chaux sont données dans les tableaux (2.1 et 2.2) (cf. fiche technique Annexe A).

Tableau 2.1. Composition Chimique de la chaux en (%)

Hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂ Totale	98,61
Hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂ Soluble	94,57
PH	-	12,4
Humidité	-	< 1
Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	0,0093
Oxyde d'Aluminium	Al ₂ O ₃	0,0182
Oxyde de Magnésium	MgO	< 0,2
Oxyde de Manganèse	Mn ₃ O ₄	0,0015
Oxyde de Silicium	SiO ₂	0,0477
Fer	Fe	0,0065
Aluminium	Al	0,0096
Silicium	Si	0,0223
Manganèse	Mn	0,0011
Dioxyde de carbone	CO ₂	< 1

Tableau 2.2. Caractéristiques physique de la chaux

Désignation	Unités	Valeurs
Finesse	%	88,39 ≤ 80 μm
Densité Absolue	kg/m ³	2460
Densité apparente	kg/m ³	460
Aspect	-	Fine poudre blanche inodore

La figure 2.1 présente la courbe granulométrique de la chaux aérienne obtenue par inspiration.

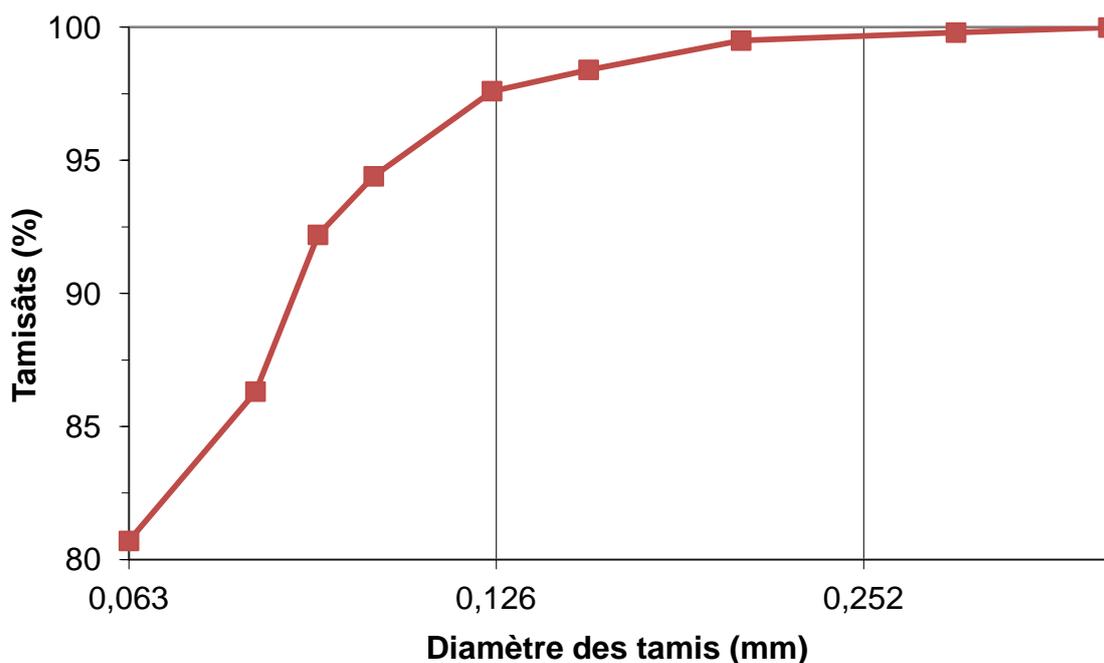


Figure 2.1. Courbes granulométriques de la chaux

2.2. La poudre de verre

Cette poudre est issue de la récupération des bouteilles en verre dans des décharges sauvages et dispersées dans la nature (montagne, bord de mer etc.). La poudre de verre est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de même couleur verte. Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier et les traces de sucre qui peuvent provoquer un retard de prise de la pâte, concassées et finement broyées (Figure 2.2). La composition chimique ainsi que les propriétés physiques de la poudre de verre de cette étude sont présentées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de verre

Analyse chimique		Analyse physiques		
Oxyde	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	72,38	Masse volumique absolue	kg/m ³	2500
Al ₂ O ₃	1,49			
Fe ₂ O ₃	0,29	Masse volumique apparente	kg/m ³	680
CaO	11,26			
MgO	0,54	S.S.B	cm ² /g	-
Na ₂ O	13,52			
K ₂ O	0,27	refus au tamis 45µm	%	-
Cr ₂ O ₃	0,13			

L'analyse aux rayons X de la poudre de verre présentée sur la figure 2.3 révèle un matériau essentiellement vitreux. Outre la fraction vitreuse, le verre présente de faibles quantités de fer.



Figure 2.2. Poudre de verre

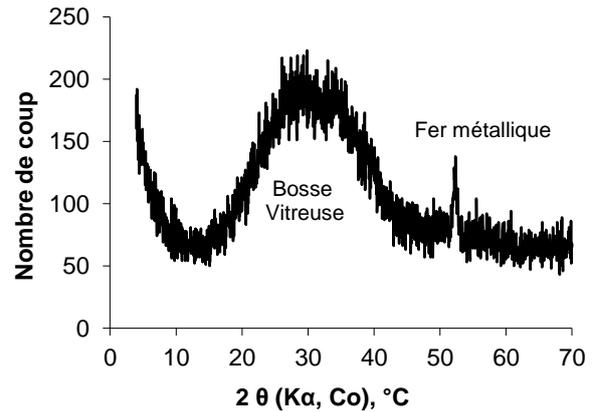


Figure 2.3. Diffractogramme du verre

2.3. Le métakaolin

Le kaolin qui a servi à l'obtention du métakaolin provient de Djebel Debbagh (Guelma), ce gisement est composé de trois catégories ou nuances selon la concentration des impuretés d'oxydes métalliques. Les trois argiles DD1, DD2 et DD3 se différencient par leurs couleurs, blanche grisâtes pour les argiles DD1 et DD2 et grise pour DD3. Le kaolin DD est un mélange de deux phases: la kaolinite $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ et l'halloysite $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$.

Le kaolin DD3 utilisé dans cette étude se présente en blocs friables composés de kaolin blanc (DD1) et de kaolins grisâtres (Figure 2.4). Utilisé tel quelle, le kaolin ne présente aucun potentiel pouzzolanique. Le métakaolin, nom donné au kaolin après calcination se caractérise par une réaction pouzzolanique améliorant les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires.



Figure 2.4. Kaolin de Djebel Debbagh 3 (DD3)

Afin de tirer profil de la réaction pouzzolanique du métakaolin, le kaolin a été séché à l'étuve avant d'être broyé puis calciné à une température de $750^{\circ}C$ pendant 4 heures dans un four à haute température. Le choix de cette température de calcination a été tiré des travaux de Rabehi (Rabehi, 2013). L'auteur a utilisé le même type de kaolin DD3 et il a étudié l'effet de la température de calcination sur l'évolution de la réactivité pouzzolanique. Pour différentes

températures de calcination de 650, 700, 750 et 800 °C, l'auteur a relevé qu'une température de 750 °C offre une meilleure réactivité pouzzolanique.

Après calcination, le métakaolin ainsi obtenu est tamisé sur un tamis de 80 µm pour récupérer uniquement le tamisât, tout ce qui ne passe pas à travers le tamis à subir à autre broyage. La composition chimique ainsi que les propriétés physiques du métakaolin de cette étude sont présentées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Composition chimique et caractéristiques physiques du métakaolin

Analyse chimique		Analyse physiques		
Oxyde	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	43,60	Masse volumique absolue	kg/m ³	2570
Al ₂ O ₃	36,85			
Fe ₂ O ₃	0,12	Masse volumique apparente	kg/m ³	745
CaO	0,20			
MgO	0,07	S.S.B	cm ² /g	-
Na ₂ O	0,14			
K ₂ O	0,09	refus au tamis 45µm	%	-
P-A-F	17,43			

2.4. Le sable

Le sable utilisé (0/2) présenté à la Figure 2.5, est un sable roulé qui provient des dunes de la Wilaya de Tébessa. Il s'agit d'un sable siliceux caractérisé par un module de finesse de 2.20.



Figure 2.5. Sable de dunes (0/2)

Les caractéristiques physiques et la composition chimique du sable utilisé sont représentées dans les tableaux 2.5 et 2.6.

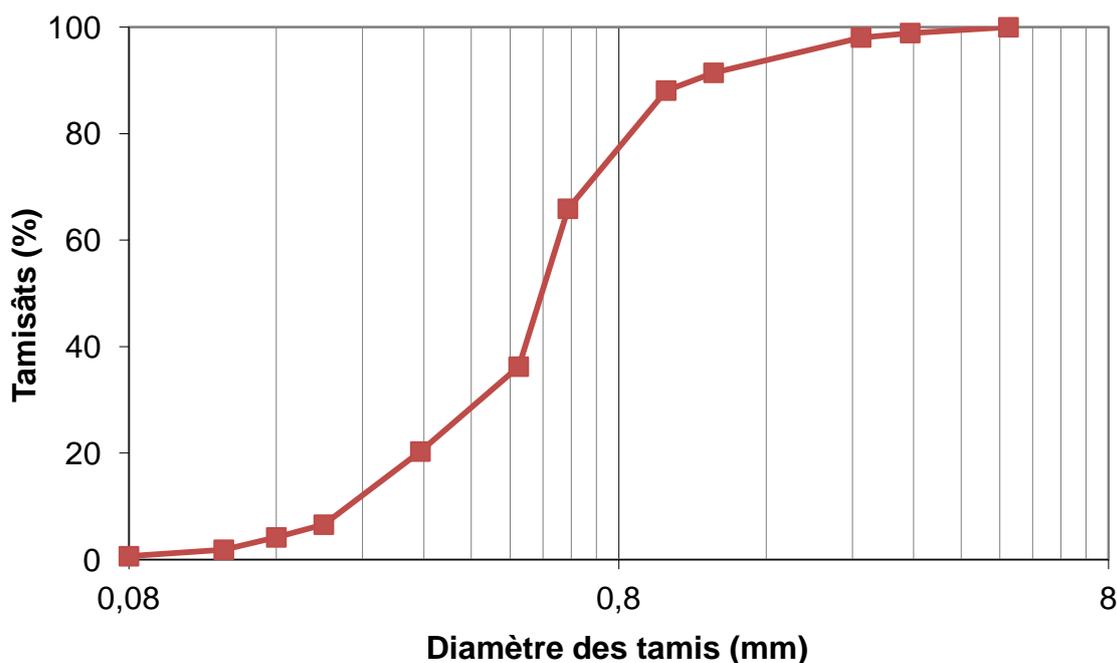
Tableau 2.5. Caractéristiques physiques du sable

Caractérisations	Unité	Roulé
Masse volumique apparente	kg/m ³	1550
Masse volumique absolue	kg/m ³	2660
d/D	mm/mm	0/2
Module de finesse	-	2.20
Equivalent de sable ¹	%	67.83
Coefficient d'absorption	%	1.34
Bleu de méthylène ²	%	1.00

Tableau 2.6. Analyse chimique du sable en (%)

SO ₃	SO ₄	CaCO ₃	CL ⁻	Matière organique	PH
0.24	0.29	1.60	0.21	1.04	8.34

La courbe granulométrique du sable utilisé pour cette étude est présentée sur la figure 2.6.

**Figure 2.6.** Courbes granulométriques du sable (0/2)

2.5. L'eau de gâchage

L'eau employée pour le gâchage du mortier provient du réseau de distribution d'eau potable de la commune de Sidi Amar, c'est une eau exempte d'impureté à vue d'œil.

¹ **Equivalent de sable:** « Sable légèrement argileux » de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

² Matériau riche en éléments fins.

3. MÉTHODE DE FORMULATION DES MORTIERS DE CHAUX

3.1. Procédure de formulation

L'approche de formulation qui a été choisie dans ce travail est celle proposée par le célèbre architecte Vitruve qui préconise une composition des mortiers de chaux avec trois volumes de sables pour un volume de chaux. Partant sur l'idée que ces proportions permettent d'avoir des mortiers à l'épreuve du temps, on s'est limité à cette composition pour la formulation du mortier témoin. Néanmoins, en ce qui concerne le dosage en eau, nous avons choisi de travailler avec une consistance fixe. Ce qui entraîne un dosage en eau variable pour chaque formulation. Pour cela, la consistance des mortiers d'étude a été réalisée sur la table à secousses pour un étalement de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ce qui correspond à une consistance plastique. La figure 2.7 présente un exemple de détermination du dosage en eau pour le mortier témoin.

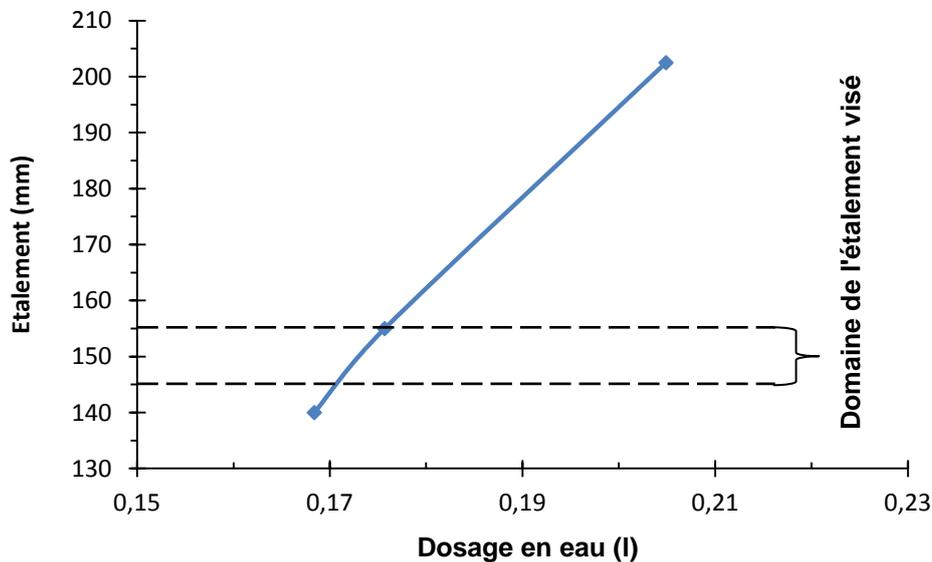


Figure 2.7. Exemple de détermination du dosage en eau du mortier témoin

L'incorporation de la poudre de verre et du métakaolin c'est fait par substitution volumique de la chaux à des taux de 10, 15, 20, 25 et 30 %. Le tableau 2.7 résume les différentes compositions des mortiers étudiés.

Tableau 2.7. Composition des mortiers d'étude

Mortiers	Constituants	Proportion Vol	Volume (l)	Masse (kg)
Mortier témoin (MT)	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	1 V	1,65	4,05
	-	-	-	0,00
	Eau	2,4 V	3,95	3,95
10% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,9 V	1,48	3,65
	Verre	0,1 V	0,16	0,42
	Eau	2,2 V	3,62	3,62

15% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,85 V	1,40	3,44
	Verre	0,15 V	0,25	0,63
	Eau	2,1 V	3,46	3,46
20% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,80 V	1,32	3,24
	Verre	0,20 V	0,33	0,84
	Eau	2,1 V	3,46	3,46
25% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,75 V	1,23	3,04
	Verre	0,25 V	0,41	1,05
	Eau	2 V	3,29	3,29
30% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,7 V	1,15	2,84
	Verre	0,3 V	0,49	1,26
	Eau	2 V	3,29	3,29
10% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,9 V	1,48	3,65
	Verre	0,1 V	0,16	0,42
	Eau	2,4 V	3,95	3,95
15% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,85 V	1,40	3,44
	Verre	0,15 V	0,25	0,63
	Eau	2,35 V	3,87	3,87
20% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,80 V	1,32	3,24
	Verre	0,20 V	0,33	0,85
	Eau	2,35 V	3,87	3,87
25% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,75 V	1,23	3,04
	Verre	0,25 V	0,41	1,06
	Eau	2,35 V	3,87	3,87
30% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,7 V	1,15	2,84
	Verre	0,3 V	0,49	1,27
	Eau	2,4 V	3,95	3,95

3.2. Préparation de la gâchée

Le malaxage des mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de cinq litres. La séquence de malaxage est décrite par la norme NBN EN 1015-2 (NBN EN 1015-2, 2007), elle consiste à verser l'ensemble des constituants (Eau, Sable, chaux et éventuellement

l'addition) et à malaxer pendant 3 minutes. À la fin du malaxage on obtient un mélange homogène.

3.3. Conservation des éprouvettes

Après le malaxage on procède à la préparation des moules prismatiques (4x4x16) cm destinés aux essais suivants :

- essais de traction par flexion (trois éprouvettes 4x4x16 cm) ;
- essai de compression (six demi-éprouvettes 4x4x16 cm) ;
- essai d'absorption d'eau par capillarité (trois éprouvettes 4x4x16 cm).

Les opérations de mise en place des éprouvettes ont été réalisées conformément au mode opératoire décrit par la NBN EN 1015-2 (NBN EN 1015-2, 2007). À la suite du coulage, les moules ont été conservés 72 heures à une température ambiante au laboratoire. Une fois le démoulage effectué, les éprouvettes sont référenciées et conservées à l'air libre jusqu'aux échéances des différents essais qui sont de 14, 28 et 56 jours pour les essais mécaniques et 56 jours pour les essais d'absorptions d'eau par capillarité. La figure 2.8 montre le mode de conservation des éprouvettes en mortiers.



Figure 2.8. Conservation des éprouvettes

4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

4.1. Essai sur mortier frais

4.1.1. Essai d'étalement à la table à secousses

Selon la norme NBN EN 1015-3 (NBN EN 1015-3, 2007), cet essai d'étalement est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du mortier à s'étaler par écoulement. L'essai

est exécuté sur une table à laquelle un moule tronconique ($D_0 = 100$ mm ; $d_0 = 70$ mm ; $h = 60$ mm) est rempli en deux couches compactées par au moins 10 coups brefs de dame. La surface libre du disque doit être propre et sèche. Au bout de 15 s, le moule est soulevé lentement et verticalement. 15 secousses à la table sont imprimées à une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde. Ensuite on mesure deux diamètres perpendiculaires d_1 et d_2 (Figure 2.9).



Figure 2.9. Etalement à la table à secousses d'un mortier de chaux

La moyenne de ces deux diamètres nous renseigne sur la consistance du mortier testé grâce au tableau 2.8.

Tableau 2.8. Plages de consistances des mortiers (NBN EN 1015-3, 2007)

Consistance d'utilisation	Valeur d'étalement	Mode opératoire
Mortier raide	< 140 mm	La méthode de vibration
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm	La méthode des chocs
Mortier fluide	> 200 mm	La méthode de remplissage

4.1.2. Masse volumique réelle

La masse volumique réelle d'un mortier frais est déterminée par le quotient de sa masse par le volume réel qu'il occupe lorsqu'il est introduit et compacté, d'une manière prescrite dans un récipient de mesure d'une capacité donnée (Figure 2.10). Selon la norme NBN EN 1015-6 (NBN EN 1015-6, 2007), le mode opératoire dépend de la valeur d'étalement.



Figure 2.10. Mesure de la masse volumique réelle

4.1.3. Délais de prises des mortiers de chaux

Le temps de prise initial des différentes formulations est déterminé avec un appareil Vicat conforme à la norme française NF P 15-431 (NF P 15-431, 1994). La méthode consiste à mesurer le temps nécessaire à la pénétration dans le matériau d'un piston muni d'un poids total de 1000 g (Figure 2.11). Le temps de prise initial est défini comme le temps écoulé depuis le contact de l'eau avec le ciment jusqu'au moment où le piston du mélange est à $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de la plaque de base. Tandis que le temps de fin de prise correspond à celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm de la surface.



Figure 2.11. Détermination des délais de prise avec l'Appareil de Vicat

4.2. Essais sur mortier durci

4.2.1. Essai de traction par flexion

Les essais de traction par flexion trois points sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ selon la norme NF EN 196-1 (NF EN 196-1, 2006). Ces essais ont été réalisés sur une machine universelle produite par Zwick/Roell de type Z020. Il s'agit d'une machine d'essai électromécanique d'une capacité de 20 kN en traction-compression, avec une traverse de 66 cm de large mobile entre deux colonnes. Son pilotage se fait par le logiciel TestExpert qui permet à la fois de consigner les paramètres d'essais, d'acquérir et de traiter les données

(Figure 2.12). Les essais de traction par flexion ont été réalisés à une vitesse de traverse de 0.01 mm/min jusqu'à rupture de l'échantillon.

Les mortiers d'étude ont été testés à l'âge de 14, 28 et 56 jours, les résistances de la flexion représentent la moyenne de trois éprouvettes.

4.2.2. Essai de compression

La résistance à la compression des mortiers est mesurée conformément à la norme EN 196-1 (NF EN 196-1, 2006) sur les demi-prismes obtenus après rupture en flexion. Les essais ont été réalisés sur la même machine que celle de la flexion avec la même vitesse de traverse (figure 2.13). Les mortiers d'étude ont été testés à l'âge de 14, 28 et 56 jours, les résistances de la compression représentent la moyenne de six éprouvettes.



Figure 2.12. Essai de traction par flexion 3 points



Figure 2.13. Essai de Compression

4.2.3. Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau capillaire caractérise le coefficient qui traduit le mouvement de l'eau dans les matériaux poreux à travers les pores ou capillaires. Le transfert d'agents agressifs à travers ces capillaires peut affecter les performances de ces matériaux.

Dans ce travail, les essais d'absorption d'eau par capillarité ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm préalablement séchées dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante. Elles ont été placées sur des supports adéquats (non absorbants) dans un bac à eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau afin de respecter un niveau d'immersion partiel constant de 5 mm (Figure 2.14). Les éprouvettes d'essai ont été par

ailleurs couvertes d'un film en aluminium pour assurer une remontée d'eau unidirectionnelle et pour empêcher l'échange hydrique avec le milieu ambiant.



Figure 2.14. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption capillaire est donné en kg/m^2 il est défini par la relation (2.1).

$$\mathbf{Ca_t} = \frac{\mathbf{M_x - M_0}}{\mathbf{A}} \quad (2.1)$$

Avec :

- M_x est la masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg) ;
- M_0 est la masse initiale de l'éprouvette (kg) ;
- A est la section de l'éprouvette (m^2).

La sorptivité est définie par la vitesse d'absorption par remontée capillaire, elle est obtenue par une régression linéaire de l'ensemble des mesures qui se trouvent dans un domaine d'évolution linéaire du coefficient d'absorption Ca_t , généralement, entre 1 et 8 heures. La sorptivité est donnée par l'équation 2.2, tirée des travaux de (Bessa-Badreddine, 2004).

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{M_{a8} - M_{a1}}}{\sqrt{\mathbf{8} - \mathbf{1}}} \quad (2.2)$$

Avec :

- S est la sorptivité ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) ;
- Ca_8 et Ca_1 : sont respectivement le coefficient d'absorption à 8 et 1 heures.

4.2.4. Suivre de la carbonatation

Le durcissement des mortiers de chaux aérienne se fait par carbonatation, cette étape intervient lorsque le mortier a été mis en œuvre et que la chaux est exposée au contact de l'air. L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) contenu dans la chaux va réagir avec le gaz carbonique (CO_2) pour former du carbonate de calcium (CaCO_3). Néanmoins, cette étape est lente et peut durer des années, voire des siècles.

Du fait de la carbonatation, le pH du mortier tombe de 12,5 à l'état frais, à environ 7 à 8 après durcissement complet. Il serait donc possible de suivre l'évolution de la carbonatation des mortiers de chaux par des mesures de l'épaisseur de mortier carbonaté prélevées sur les demi-prismes obtenus après rupture en flexion. Pour cela, les surfaces des demi-prismes sont pulvérisées par une solution de phénolphtaléine. Celle-ci vire au rouge violacé au contact de matériaux dont le pH est supérieur à 9,2 et demeure incolore pour les faibles valeurs de pH, c'est-à-dire pour les zones carbonatées (Figure 2.15).

Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières telles que les coins et les interfaces pâtes granulats. Le suivi de la carbonatation a été réalisé en parallèle avec les essais mécaniques, c'est-à-dire à 14, 28 et 56 jours de maturation.

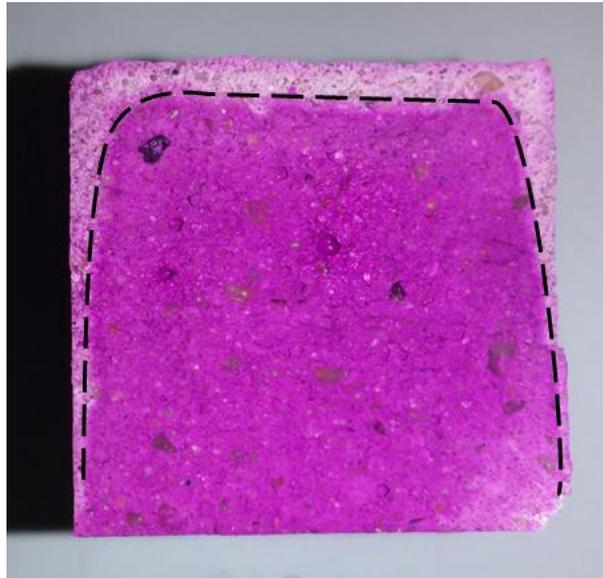


Figure 2.15. Photographie d'un échantillon de mortier de chaux à base de 30 % de poudre de verre à 56 jours de maturation

5. CONCLUSION

Ce chapitre est consacré à la description des différents matériaux utilisés pour les formulations des mortiers de chaux avec de la poudre de verre et du métakaolin qu'on a réalisés de manière traditionnelle.

Pour comprendre les caractéristiques dès nos ajouts (poudre de verre et métakaolin) dans les mortiers à base de chaux aérienne, nous avons procédé à des essais physiques et mécaniques, qui ont été expliqués en détail avec leur mode opératoire. L'ensemble des résultats de cette étude sont présentés et analysés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR MORTIERS DE CHAUX

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS SUR MORTIERS DE CHAUX

Ce chapitre est consacré aux résultats des essais réalisés sur les mortiers étudiés à l'état frais, ainsi que les performances mécaniques à l'état durcis. Toutes les procédures expérimentales ont été exposées en détails dans le chapitre précédent.

Sommaire

1. INTRODUCTION	37
2. RÉSULTATS OBTENUS SUR MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS	37
2.1. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur la consistance.....	37
2.2. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les délais de prise.....	38
3. RÉSULTATS OBTENUS SUR MORTIERS À L'ÉTAT DURCIS	40
3.1. Résistance mécanique à la flexion par traction.....	40
3.2. Résistance mécanique à la compression	41
3.3. Absorption d'eau par capillarité	42
3.4. Suivre de la carbonatation.....	44
4. CONCLUSION	44

Chapitre III Résultats et discussions sur mortiers de chaux

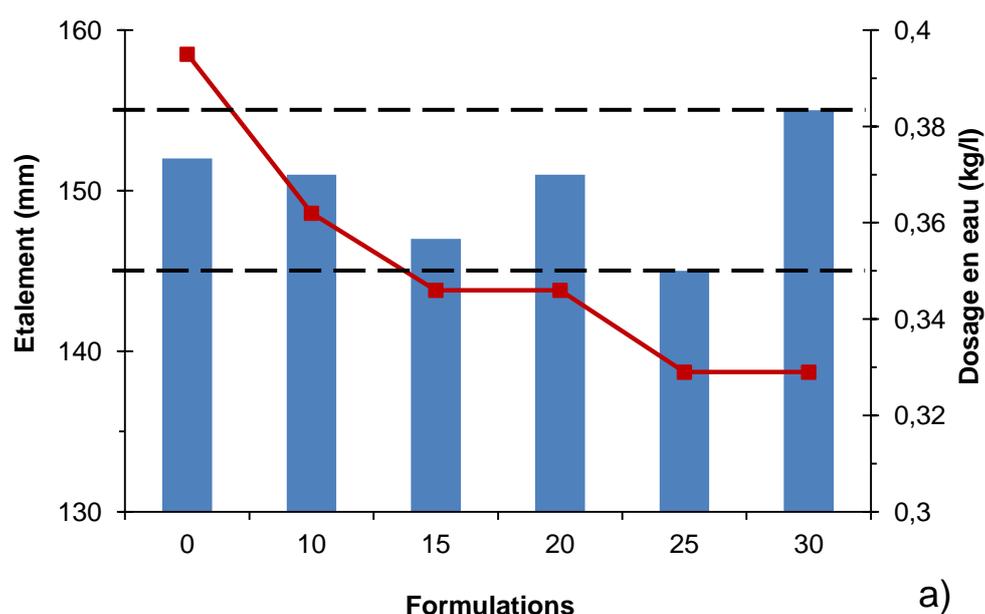
1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence de la substitution de la poudre de verre et du métakaolin sur les propriétés des mortiers à base de chaux aérienne. Les mortiers de chaux aérienne sont employés dans les travaux de réhabilitation de l'ancien bâti, leurs lenteurs de prise ainsi que leurs faibles résistances sont leurs principaux inconvénients. La poudre de verre ainsi que le métakaolin sont des pouzzolanes artificielles qu'on a substituées en cinq taux différents de 10, 15, 20, 25 et 30 % par rapport au volume de la chaux afin d'améliorer les propriétés à l'état frais et à l'état durci. Plusieurs essais normalisés ont été effectués au laboratoire : début et fin de prise, résistance à la compression et la traction à 14, 28, et 56 jours, absorption d'eau par capillarité et un suivi de la carbonatation par pulvérisation d'une solution de phénophtaléine.

2. RÉSULTATS OBTENUS SUR MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS

2.1. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur la consistance

Pour la formulation des mortiers, nous avons choisi de préparer des mélanges à consistance fixe, soit un étalement à la table secousses de l'ordre de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ et par conséquent le dosage en eau sera variable. Cette valeur d'étalement est celle mentionnée dans la bibliographie. Ce choix nous facilitera la comparaison des caractéristiques étudiées. Les valeurs de consistances sont présentées dans la figure 3.1 sous forme d'histogramme avec les deux limites inférieures et supérieures de la consistance visée. Et la courbe représente le dosage en eau en kg/l des différents mélanges pour une consistance fixe.



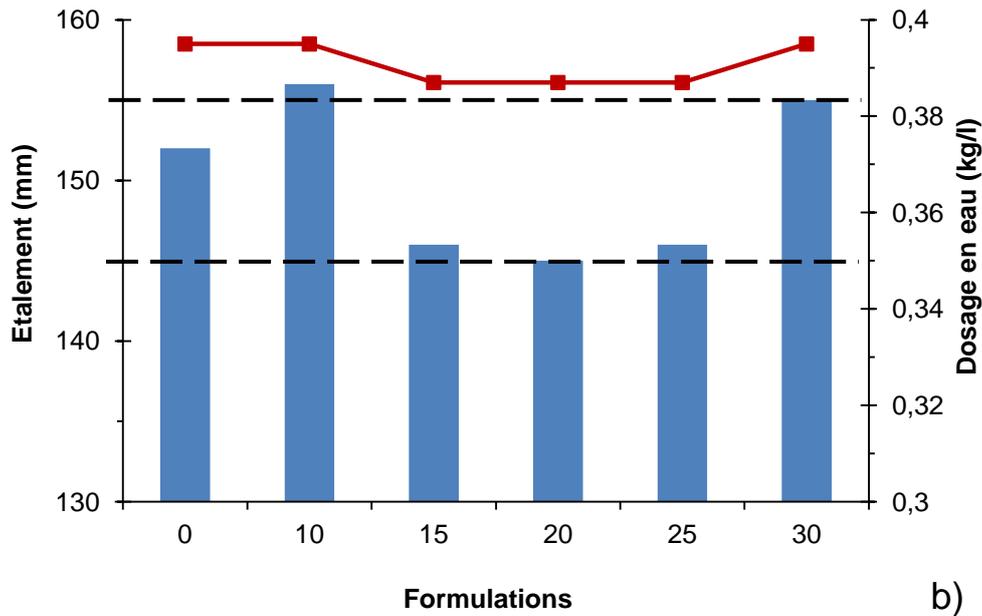


Figure 3.1. Effet de la substitution de la chaux sur la demande en eau des mortiers : a- Poudre de verre et b- Métakaolin

On constate d'après la figure 3.1 que la substitution de la chaux aérienne par de la poudre de verre et plus en réduit le dosage en eau nécessaire à l'obtention d'une consistance de 150 mm \pm 5 mm. En effet, la substitution volumique de la chaux par 30 % de poudre de verre réduit le dosage en eau de 16,7 %, la poudre de verre joue le rôle de fluidifiant. Ce phénomène a été constaté par Idir (Idir, 2009), qui rapporte qu'un dosage de 10 à 30 % en poudre de verre a un effet fluidifiant. De ce fait on conclut que la demande en eau de la poudre de verre est moins importante que celle de la chaux.

En ce qui concerne le métakaolin, on constate une faible réduction du dosage en eau pour un taux de substitution de 15 % avec une réduction d'eau estimée à 2 %. Pour un taux de substitution supérieur à 25 % en métakaolin, la demande en eau pour maintenir une consistance fixe augmente. Il semblerait que la demande en eau du métakaolin est aussi semblable à celle de la chaux. Courard et al. (Courard *et al.*, 2003) ont étudié l'évolution de la consistance de mortier sans superplastifiant et à même rapport E/C = 0,5 en fonction de la teneur en métakaolin. Les auteurs rapportent que la consistance des mortiers diminue avec l'augmentation de la teneur en métakaolins, ce qui est lié à une demande en eau croissante des métakaolins qui réduit la fluidité des mortiers.

2.2. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les délais de prise

L'estimation de l'apport de la poudre de verre, et du métakaolin en fonction des proportions de substitution sur le temps de prise ont été effectuées à l'aide de l'essai Vicat, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure 3.2. Les résultats obtenus ont été comparés à leur tours à ceux de la formulation de base.

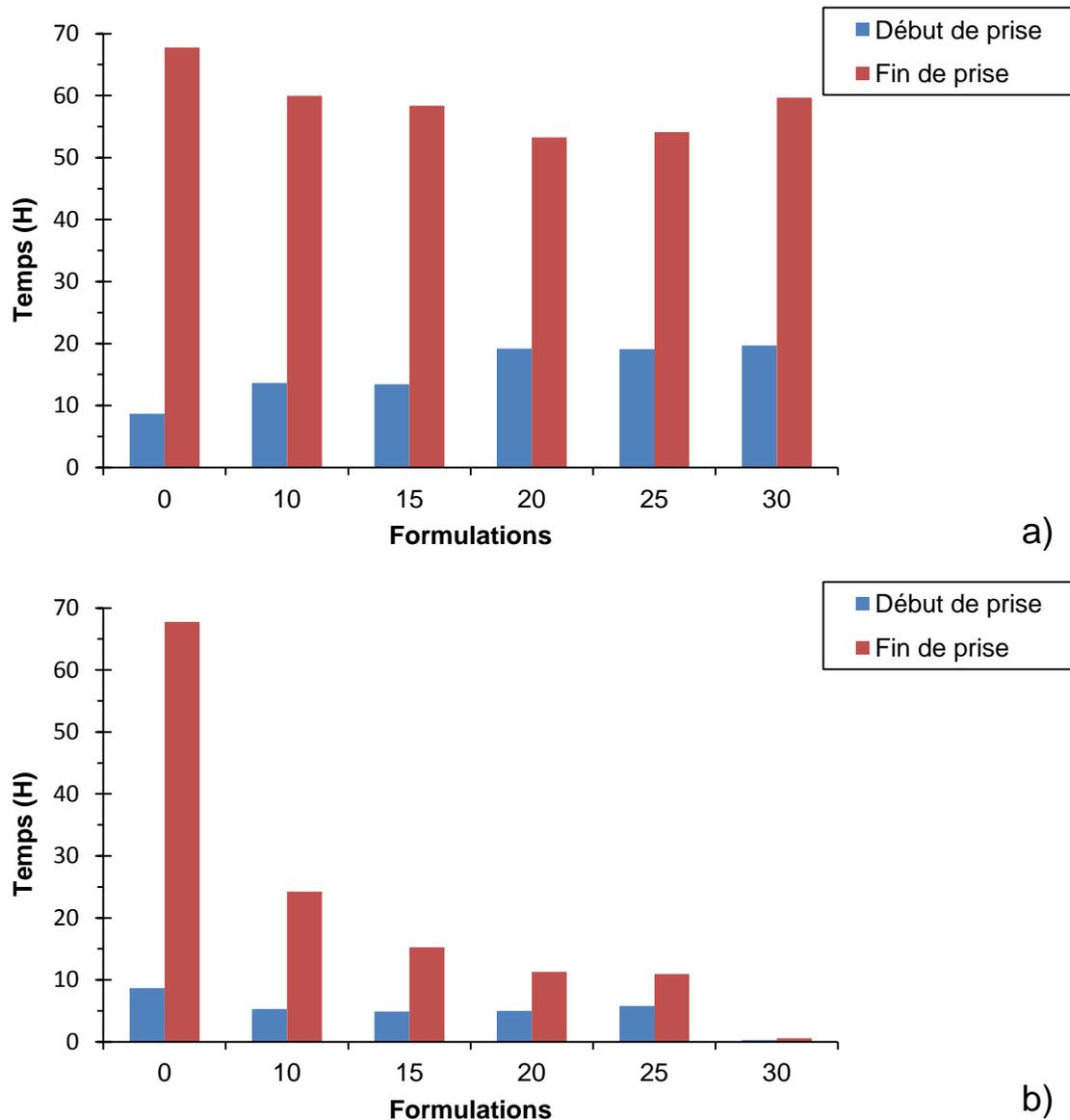


Figure 3.2. Effet de la substitution de la chaux sur les délais de prise : a- Poudre de verre et b- Métakaolin

D'après la figure 3.2-a on constate que la substitution de la chaux par de la poudre de verre ne réduit pas le début de prise du mortier témoin (MT), on assiste à une augmentation des temps de début de prise avec l'augmentation du taux de substitution de la chaux. À titre d'exemple, une substitution de la chaux par 15 % de poudre de verre augmente le début de prise du mortier de 55 %, tandis qu'une substitution à 30 % de poudre de verre augmente le début de prise de 127 %. Jusqu'à un taux de substitution de 20 % en poudre de verre, la fin de prise décroît, au-delà de ce taux, on assiste à une augmentation de la fin de prise, cependant, la fin de prise du mortier à base de 30 % de poudre de verre est inférieure à celle du mortier témoin.

La substitution de la chaux par du métakaolin réduit significativement les délais de prise des mortiers, l'ensemble des substitutions présentent des débuts et des fins de prises inférieurs au mortier témoin. Un taux de 30 % de substitution en métakaolin réduit respectivement le début et fin de prise de 96 % et 99 %. Ces résultats rejoignent ceux trouvés par Russlan et al.

(Russlan *et al.*, 2018) qui rapportent que la substitution de la chaux aérienne par du métakaolin réduit la fin de prise des mortiers de 40 %.

3. RÉSULTATS OBTENUS SUR MORTIERS À L'ÉTAT DURCIS

3.1. Résistance mécanique à la traction par flexion

La figure 3.3 présente le suivi des résultats en flexions 3 points du mortier témoin (MT) et des mortiers à base de poudre de verre et de métakaolin à des échéances de 14, 28 et 56 jours.

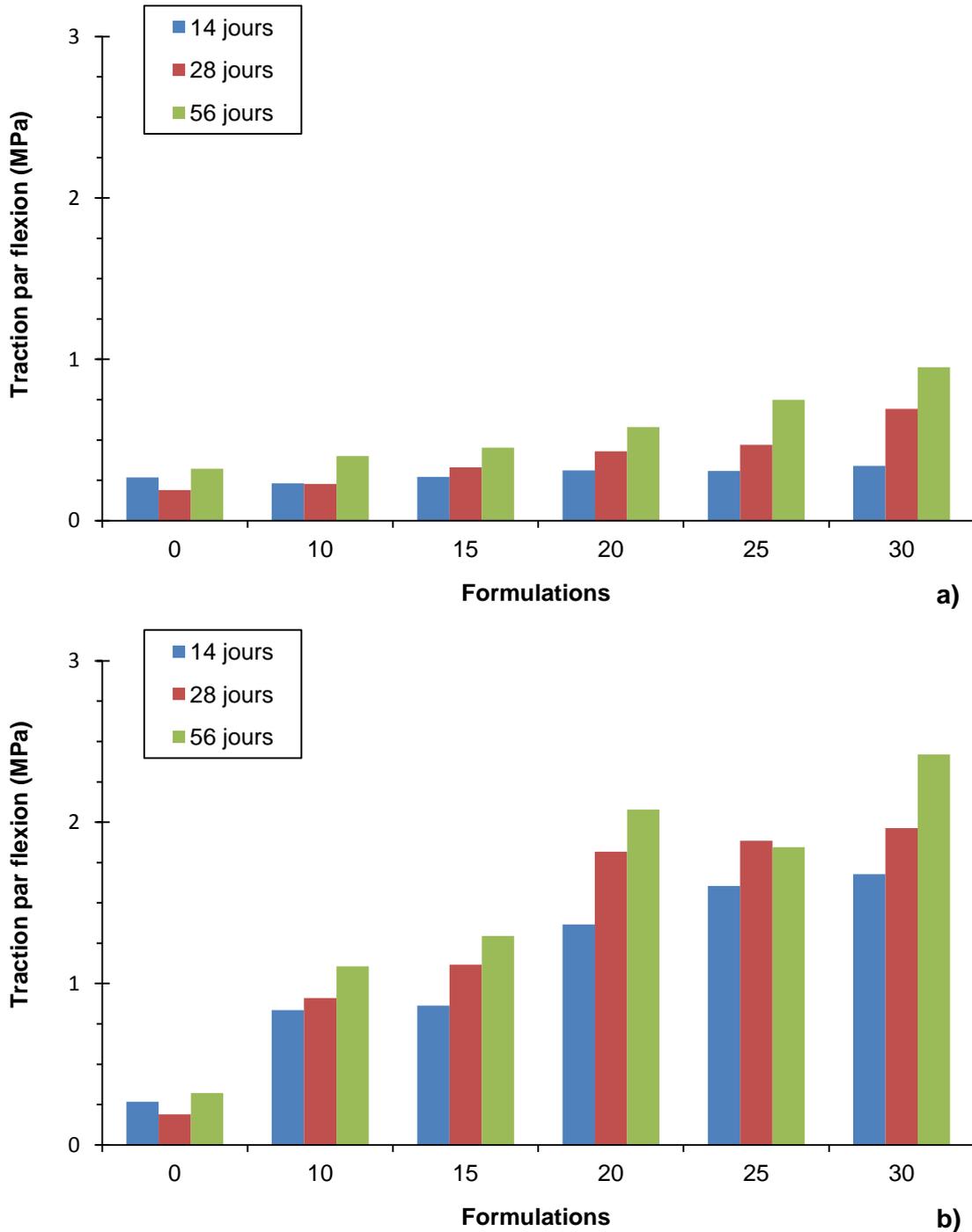


Figure 3.3. Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la flexion : a- Poudre de verre et b- Métakaolin

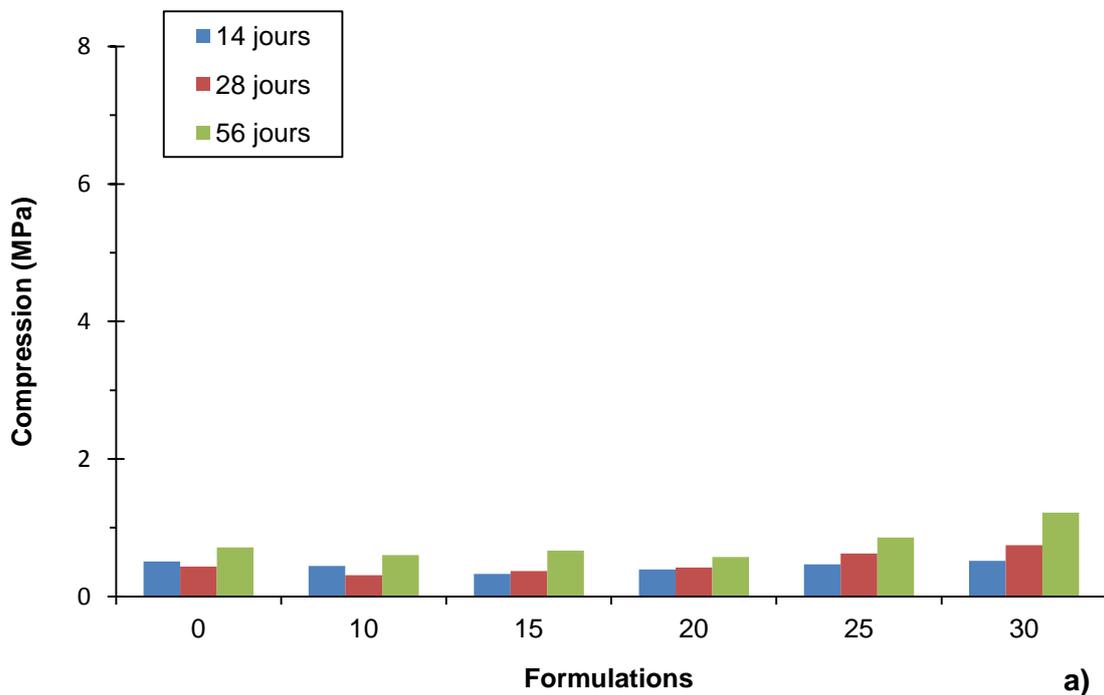
D'après la figure 3.3 on remarque clairement l'effet bénéfique du métakaolin en substitution de la chaux par rapport à l'utilisation de la poudre de verre. L'ensemble des mortiers à base de métakaolin développent des résistances à la flexion supérieure au mortier témoin. Cette amélioration des résistances est proportionnelle au taux de substitution. Un taux de substitution de 30 % en métakaolin permet d'avoir le maximum de résistance.

L'amélioration des résistances à la flexion des mortiers à base de poudre de verre est faible, on assiste à une légère amélioration par rapport au mortier témoin. Là aussi l'amélioration des résistances à la flexion est proportionnelle à l'augmentation du taux de substitution de la chaux. La meilleure résistance est obtenue avec un taux de 30 % en poudre de verre.

L'amélioration des résistances des mortiers à base de poudre de verre et du métakaolin est essentiellement liée à la réaction pouzzolanique entre la silice amorphe contenue dans ses additions et l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenue dans la chaux aérienne, le résultat de cette combinaison est la formation de C-S-H qui favorise le développement des résistances. Cependant, les réactions pouzzolaniques dans les mortiers à base de métakaolin sont plus importantes que celle de la poudre de verre.

3.2. Résistance mécanique à la compression

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. La figure 3.4 représente les résultats de la compression, chaque valeur est la moyenne de six valeurs de compression.



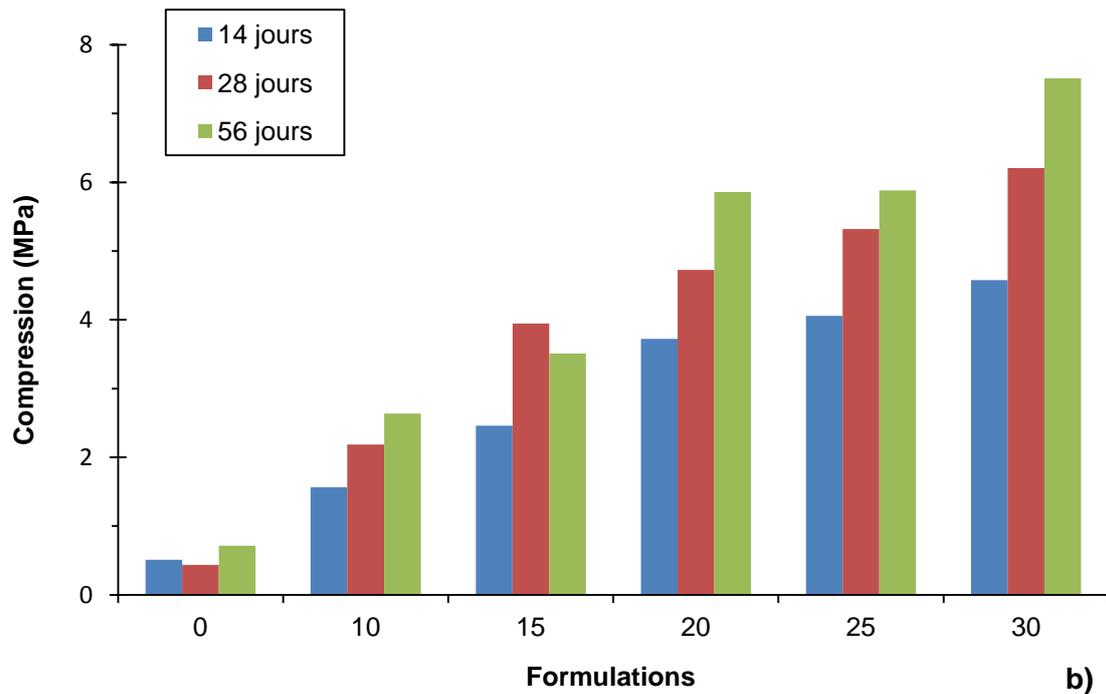


Figure 3.4. Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la compression : a- Poudre de verre et b- Métakaolin

Le même constat peut-être tiré de la figure 3.4. Les mortiers à base de métakaolin développent les meilleures résistances par rapport à ceux de la poudre de verre. On assiste à une augmentation des résistances mécaniques pour un taux de 15 % de substitution en métakaolin de 387 % et pour un taux de 30 % en métakaolin de 943 %. Pour les mêmes explications que celle déjà avancé dans le paragraphe précédent, les réactions pouzzolaniques ont favorisé le développement des résistances mécaniques. Cerny et al. (Cerny *et al.*, 2006) rapportent que L'augmentation de la résistance à la compression et la résistance à la flexion des mortiers avec le métakaolin peut être attribuées à la formation des C-S-H et l'aluminate de calcium hydraté qui ont une structure plus forte que celle des carbonates de calcium.

Les mêmes arguments peuvent expliquer l'augmentation de la résistance mécanique des mortiers de chaux avec la poudre de verre, car cette augmentation est aussi liée à la nature de la réaction chimique entre la pouzzolane et la chaux (Cerny *et al.*, 2006).

3.3. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'absorption d'eau par capillarité en fonction de la racine carrée du temps pour l'ensemble des mortiers sont présentés dans la figure 3.5.

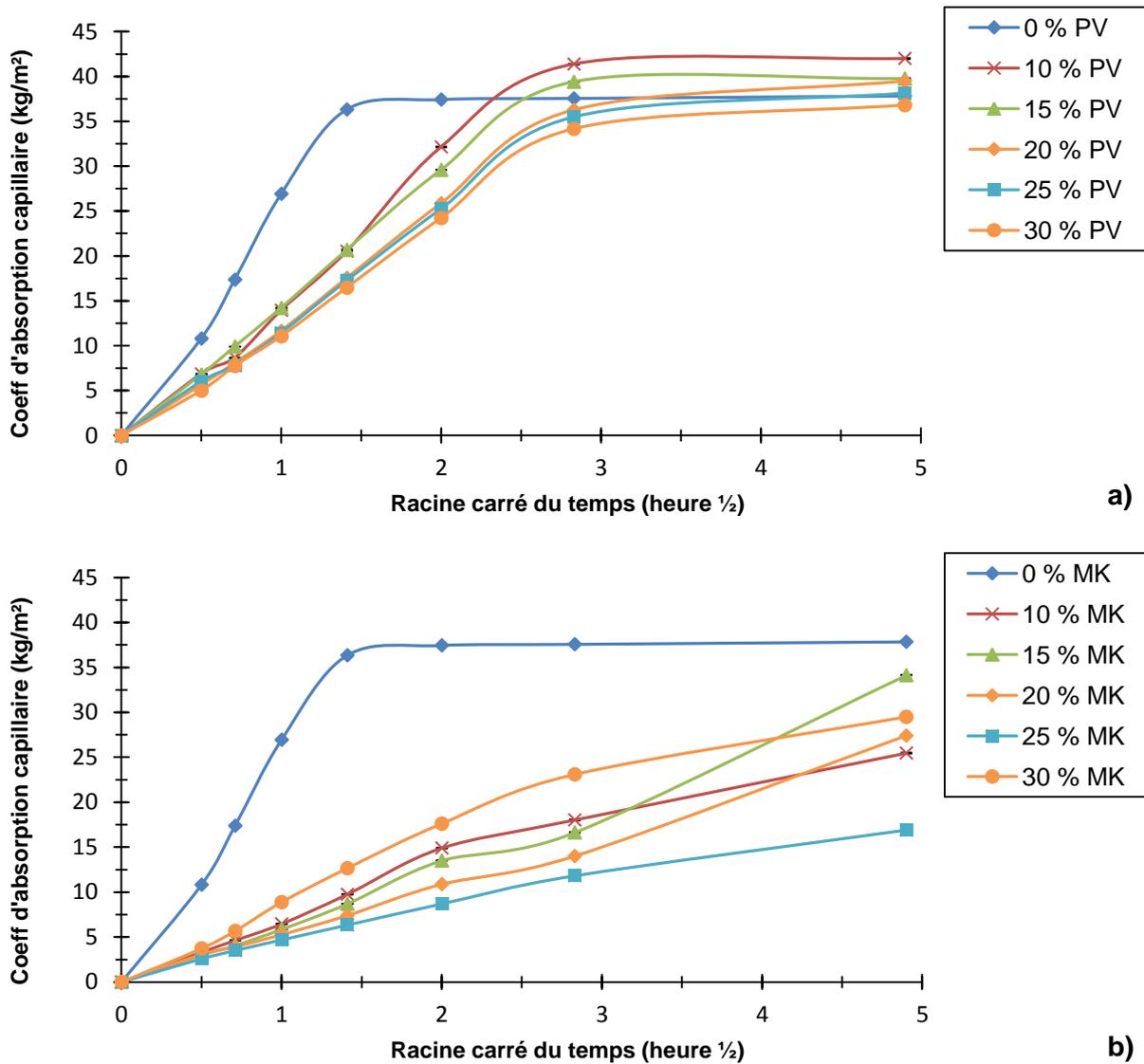


Figure 3.5. Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers : a- Poudre de verre et b- Métakaolin

D'après la figure 3.5-a on constate que les courbes d'absorption sont composées de deux parties, une partie linéaire qui correspond à l'absorption capillaire des mortiers dans le temps et une deuxième partie qui correspond à une stabilisation des coefficients d'absorption dans le temps. Ayat (Ayat, 2015) explique ce palier, non pas à cause d'une saturation de l'échantillon mais, en raison de l'équilibre atteint entre la force de capillarité (ascendante) et celle de la gravitation (descendante). Les mortiers à base de poudre de verre enregistrent des taux d'absorptions supérieurs aux mortiers à base de métakaolin (figure 3.5-b).

Les réactions pouzzolaniques conduisent à la formation de C-S-H plus importante dans les mortiers à base de métakaolin, ces C-S-H viennent tapisser les parois des pores capillaires en réduisant ainsi leurs diamètres et l'absorption par la même occasion.

Les plus faibles coefficients d'absorption capillaire sont obtenus avec des taux de 30 % de substitution de la chaux, que ce soit en poudre de verre ou bien en métakaolin.

3.4. Suivre de la carbonatation

Le suivre de la carbonatation pour des échéances jusqu'à 56 jours n'a pas donné un résultat exploitable. Les épaisseurs carbonatées relevées sur les échenillons été de l'ordre de quelques millimètres difficilement comparables. Il semblerait qu'une période de durcissement égale à 56 jours n'ait pas suffisante pour conclure à une carbonatation des mortiers de chaux.

4. CONCLUSION

Les résultats obtenus à travers des essais de caractérisation effectués nous ont conduits aux informations suivantes :

- La poudre de verre et le métakaolin ont un effet positif sur les propriétés des mortiers de chaux, plus précisément la résistance mécanique et le délai de prise ;
- Le temps de prise s'est nettement amélioré pour les deux additions ;
- Le métakaolin a donné les meilleurs résultats concernant la résistance à la flexion et à la compression et cela pour un taux de 30%. On a remarqué que plus le taux de pourcentage augmente, plus la résistance augmente, ce qui nous ouvre la possibilité d'aller au-delà de 30 % de substitution ;
- Concernant l'absorption par capillarité, c'est aussi le métakaolin qui a donné les coefficients d'absorptions les plus faibles, et donc des mortiers moins sorptifs.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les techniques et matériaux de la réhabilitation du vieux bâti ont fait objets de plusieurs recherches ces dernières années, et les avantages des mortiers de chaux dans ce domaine ne sont plus à prouver. Notre objectif dans ce travail était d'étudier l'influence de deux additions à caractères pouzzolaniques, sur les différentes propriétés des mortiers à base de chaux aérienne.

Dans le premier chapitre nous avons exposé une bibliographie qui a confirmé que la chaux est le matériau le plus adaptable pour les chantiers de réhabilitations. Employée dans les mortiers, elle fut durement concurrencée par les liants hydrauliques à cause de sa lenteur de prise, mais les anciens ont su pallier cet inconvénient par l'ajout de matériaux à caractère pouzzolanique tels que le tuileau pilé ou le métakaolin en proportions bien définies.

On a essayé par ce travail de voir l'influence de la poudre de verre, et du métakaolin sur les caractéristiques des mortiers à base chaux. Ces deux matériaux dont le caractère pouzzolanique n'est plus à discuter, sont couramment utilisés dans les bétons, et apportent beaucoup d'avantages surtout sur le plan résistance mécanique et durabilité.

Les matériaux utilisés sont tous locaux, et les essais ont tous été fait au laboratoire selon les normes. Les résultats obtenus sont globalement positifs :

- Concernant le temps de prise, la poudre de verre et le métakaolin ont sensiblement accéléré le temps de prise, et cette amélioration est significative surtout pour le métakaolin qui a donné les meilleurs résultats.
- S'agissant des résistances mécaniques à la traction, et à la compression, la poudre de verre et le métakaolin ont augmentées les résistances, cependant c'est le métakaolin qui a donné les meilleures résistances qui augmentaient proportionnellement avec l'augmentation du taux de substitution, incitant ainsi l'éventualité d'essayer des pourcentages au-delà de 30%.
- Pour l'absorption par capillarité, c'est le métakaolin qui a données les coefficients les plus faibles, et donc un matériau moins absorbant.

En générale, en comparant les deux additions pouzzolaniques, on peut conclure le métakaolin est le plus avantageux pour les mortiers de chaux, cependant il est nécessaire de poursuivre ce travail en menant des investigations dans :

- Les observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) pour voir la matrice de la chaux avec la poudre de verre et le métakaolin.
- Caractériser les mortiers à long terme (jusqu'à 365 jours).
- Augmenter les taux de substitutions au-delà de 30% pour le métakaolin.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

AGGELAKOPOULOU E., BAKOLAS A., MOROPOULOU A. (2011) ;Properties of lime–metakaolin mortars for the restoration of historic masonries *Applied Clay Science*.

AMBROISE, J., MAXIMILIEN, S. AND PEAR, J. (1994) Properties of Metakaolin Blended Cements. *Advanced Cement Based Materials*, 1, 161-168.

AMR, H. A. RUSSLAN, A. M., SHARKAWI, S., FAKHRY M. A. (2018). Performance of modified lime mortar for conservation of ancient buildings. 2nd International Conference on Innovative Building Materials. Caire, Egypt, December 2-4.

ANDRIOLO, F.R., SGARABOZA, B.C. (1985). Proceedings of the 7th International Conference of AAR, Ed. Grattan-Bellow, p. 66-70.

ANISSA BADREDDINE BESSA(2004). Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physique,mécanique et de durabilité des mortiers

AYAT, A , (2015),contribution à l'élaboration et la caractérisation d'un Eco-mortier d'enduit à base de chaux et déchets de briques pour la réhabilitation du vieux bâti ,P23 P28.

B

BESSA-BADREDDINE, A. (2004). Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.

BOUREZG, M. (2013). Etude géologique et minière de quelques roches industrielles : cas d'applications dans le nord-est Algérien, Thèse de doctorat en science, université de Constantine.

C

ČERNÝ, R., KUNCA, A., TYDLITÁT, V., DRCHALOVÁ, J., ROVNANÍKOVÁ, P. (2006). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, 20(10), 849-857.

CHEKIREB, S. (2015). Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada.

CHEN, C.H., HUANG, R., WU, J.K. et YANG, C.C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, *Cement and Concrete Research*, vol.36, n° 3, p.449-456.

COURARD L., DARIMONT A., SCHOUTERDEN M., FERAUCHE F., WILLEM X., DEGEIMBRE R. (2003). Durability of mortars modified with metakaolin *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p. 1473-1479.

COUTELAS,A. (2005) « Le mortier de chaux ». Éditions errance, Paris. P 15.

E

EDWARDS SV, et al. (2007). High-resolution species trees without concatenation. Proc Natl Acad Sci U S A 104(14):5936-41

F

(FRAGATA et al., 2007). application of crushed Glass residues in Mortars ,Sustainable building ,Lisbon

I

IDIR, R. (2009). Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, Thèse de doctorat en cotutelle, INSA de Toulouse, France – l'Université de Sherbrooke, Canada.

K

KARAMBERI, A. et MOUTSATSOU, A. (2005). Participation of coloured glass cullet in cementitious materials, Cement and Concrete Composites, vol.27, p.319–327.

L

LIMA SOUZA P.S,DAL MOLIN D.C.C ,viability of using calcined clays,from industrial by-products,as pozzolans of high reactivity.

M

MCKEE, H. J.,(1973). Introduction to early American masonry – stone, Brick, Mortar and plaster. Washington, D.C.: National Trust for Historic Preservation and Columbia University.

MEASSON, H. (1981). Thèse. Etude de l'activité pouzzolanique de matériaux naturels traités thermiquement en vue de la réalisation des liants hydrauliques. Université Paul Sabatier de Toulouse.

N

NBN EN 1015-2. (2007). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 2 : échantillonnage global des mortiers et préparation des mortiers d'essai.

NBN EN 1015-3. (2007). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses).

NBN EN 1015-6. (2007). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais.

NF EN 196-1. (2006). Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances mécaniques.

NF EN 459. (2012). Chaux de construction - Partie 2 : méthodes d'essai

NF P 15-431. (1994). Liants hydraulique-Technique des essais ,détermination du temps de prise sur mortier normal.

R

RABEHI, B. (2013). Evaluation des propriétés réfractaires et cimentaires du kaolin de Djebel Debbagh, Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Algérie.

S

SHAO, Y (2000). Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research, vol.30, n° 1, p.91-100.

SHAYAN, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, Cement and Concrete Research, vol.36, n° 3, p.457-468.

SHI, C., WU, Y., RIEFLER, C. et WANG, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powder, Cement and Concrete Research, vol.35, n° 5, p.987-993.

ANNEXES

Annexe - A : Fiche technique du ciment

FICHE TECHNIQUE



CHAUX ETEINTE (El Khroub)

Unité de production

Daira: El Khroub

Wilaya: Constantine

Produits

Chaux Eteinte

Fleur de Chaux

Chaux Hydratée

Capacité de production

Four à Chaux d'une capacité 126T/j

Caractéristiques physiques

Finesse	88,39 % ≤ 80µm
Densité apparente	0,65g/cm ³
Poids moléculaire	74,09 g/mole
Blancheur	L* : 97,19 a*:+0,08 b*:+1,21
Aspect	Fine poudre blanche inodore

Caractéristiques chimiques

Hydroxyde de Calcium	Ca(OH) ₂ Totale	98,61%
Hydroxyde de Calcium	Ca(OH) ₂ Soluble	94,57%
PH		12,4
Humidité		< 1%
Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	0,0093%
Oxyde d'Aluminium	Al ₂ O ₃	0,0182%
Oxyde de Magnésium	MgO	< 0,2%
Oxyde de Manganèse	Mn ₂ O ₄	0,0015%
Oxyde de Silicium	SiO ₂	0,0477%
Fer	Fe	0,0065%
Aluminium	Al	0,0096%
Silicium	Si	0,0223%
Manganèse	Mn	0,0011%
Dioxyde de Carbone	CO ₂	< 1%



Nom Chimique

Hydroxyde de calcium Ca(OH)₂

N° C.A.S: 1305-62-0

EINECS: 215-137-3

Méthode de production

La chaux vive résulte de la cuisson à environ 1100- 1200 C. de pierres calcaires qui devient avec l'eau de la chaux hydratée (éteinte):
 $CaO + H_2O = Ca(OH)_2$
 Elle est obtenue en faisant agir de l'eau sur la chaux vive ou en laissant cette dernière à l'air.

Applications

Dessalement d'eau de mer

Industrie sucrière

Batiment

Traitement des eaux potables

Industrie pétrolière

Condition de stockage

Conserver au sec

Isoler à l'abri de l'humidité

Séparer des acides

Livraison

Big bag

Sac 25kg

Vrac (cocotte)