

Résumé :

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, plâtre ou peinture 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 fer sur les caractéristiques à l'état frais et durci des mortiers de la chaux.

Tous les matériaux utilisés sont locaux, la poudre de fer ajoutée à la chaux en cinq taux : 0%, 2%, 5%, 8%, et 15 %. Les Cinq formulations ont été caractérisés à l'état frais (temps de prise) ainsi, qu'à l'état durci la résistance de (R_C , R_T).

Les résultats de ce travail sont généralement positifs et prouvent la faisabilité de l'incorporation de la poudre de fer 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.

Les mots clés : chaux aérienne, résistance, poudre de fer, mortier, réhabilitation, Formulation, matériaux, amélioration, prise, compression, traction, durabilité.

Abstract

Abstract :

Lime is a natural material that has continued through the ages and times. With its chemical and physical characteristics, several areas find their answers. Its use in construction as a mortar, coating or whitewash dates back several millennia, but in recent years it has been supplanted by cement, its artificial successor. With the development of ideas on architectural heritage and its preservation, lime found a new lease of life. Being the basic material in the old building, it has properties compatible with the requirements of rehabilitation, and its use brings advantages, whether on the constructive, aesthetic, historical or environmental side. The aim of this work is to study the influence of iron powder on the fresh and hardened characteristics of lime mortars.

All the materials used are local, the iron powder added to the lime in five rates: 0%, 2%, 5%, 8%, and 15%. The five formulations were characterized in the fresh state (setting time) as well as in the hardened state (R_C , R_T).

The results of this work are generally positive and prove the feasibility of incorporating iron powder into aerial 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. An additional study on the durability of these mortars is however necessary for a complete evaluation.

Keywords : aerial lime, mortar, resistance, iron powder, rehabilitation, formulations, materials, improvement, setting, compression, traction, durability.

ملخص:

الجير مادة طبيعية استمرت عبر العصور والأوقات , نظرا لخصائصه الكيميائية و الفيزيائية ,العديد من المجالات تجد جوابا لتساؤلاتها , يعود استعماله في المبنى كملاط , حص 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 , واستخدامه يجلب فوائد , سواء على الجانب الشكلي للبناء أو الجانب الجمالي أو التاريخي أو حتى البيئي.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير مسحوق الحديد على الخصائص الطازجة والصلبة لملاط الجيري.

جميع المواد المستخدمة محلية , و مسحوق الحديد المضاف في الملاط الجيري في خمس نسب التالية 0 % و 2 % و 5%

8% , 15% تم تحديد خصائص التركيبات الخمسة في الحالة الطازجة (وقت الاعداد) وكذلك في الحالة الصلبة (R_C, R_T).

نتائج هذا العمل بشكل عام إيجابية وتثبت إمكانية مسحوق الحديد في ملاط المعالجة بالجير على وجه الخصوص , فإنها تظهر

تحسنا ملحوظا في الإعداد مقارنة مع الملاط الجير المرجعي , ذلك زيادة واضحة في المقاومة و مع ذلك فإن إجراء مزيد من الدراسة حول

صلابة هذا الملاط ضروري لإجراء تقييم شامل.

الكلمات المفتاحية: الجير، الملاط، المقاومة، مسحوق الحديد، تأهيل، التركيبات، المواد، تحسن، الإعداد، ضغط، الشد، الصلابة.



Dédicas

A ma mère et mon père qui me sont les plus chers au monde qui illuminent ma vie, qui ont été toujours présents à mes côtés pour me soutenir et me donner le courage pour terminer mes études.

A mes frères Younes et hichem et oussama et yacine, qui m'ont beaucoup aidé et soutenue, je vous souhaite tout le bonheur

durant votre vie.

A toute ma famille Bouzid et Labeled qui m'a encouragé et soutenu durant mes études. A tous mes amis et collègues plus pour leur présence et encouragements. Pour m'avoir apporté tout l'aide possible pendant toute la durée de ce travail.

A tous ceux qui m'ont aidé à finir Ce mémoire.

«Mohammed El Amine»





Dédicas

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail que Je dédie : A mes très chères parents, en témoignage de ma reconnaissance pour leur amour, soutien et encouragement. Je n'oublierai jamais leurs patiences et leurs aides. Que Dieu les garde et protège ; A mes frères et sœurs ; je souhaite pour eux de la joie et de succès ; A ma grande mère , je souhaite à leur une longue vie pleine de bonne santé ; A toute ma famille Sebai et Naouia qui m'a encouragé et soutenu durant mes études A tout mes amies et A mes profs qui me aidé à mon parcours universitaire, je souhaite la bonne continuité et de réussite.

«Abdenour»





Remerciements

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant qui nous a donnés le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tienons à exprimer mes remerciements et mes gratitudees à mon encadreur Monsieur Amieur Abdenacer et membres du jury.

Je remercie également toute l'équipe LTPS pour leur accueil, leur esprit d'équipe.

Un grand remerciement aussi au département hydraulique et génie civil de l'université Ghardaïa et à tous ses administrateurs et enseignants.



Liste des tableaux

CHAPITER I	
Tableau. I.1 : Types et tailles de fours à chaux en service	19
CHAPITER II	
Tableau. II.1 : Caractéristiques chimiques	33
Tableau. II.2 : Caractéristiques physiques	33
Tableau. II.3 : Caractéristiques de sable	37
Tableau. II.4 : Analyse granulométrique de sable	39
Tableau. II.5 : Les résultats de l'essai d'équivalent du sable	46
Tableau. II.6 : Les types de chaux par le volume d'eau absorbé	46
Tableau. II.7 : Caractéristiques chimiques de la poudre de fer	47
Tableau. II.8 : Caractéristiques Physique de la poudre de fer	47
Tableau. II.9 : Les différentes compositions des mortiers étudiés.	52
CHAPITER III	
Tableau. III.1 : Résistance mécanique à la traction par flexion	59
Tableau. III.2 : Résistance mécanique à la compression	62
Tableau. III.3 : La densité des mortiers	65

Liste des figures

CHAPITER I	
Fig. I.1 : Le cycle de la chaux	7
Fig. I.2 : Représentation schématique d'un four traditionnel	13
Fig. I.3 : Schéma simplifié d'un four vertical	15
Fig. I.4 : Schéma simplifié d'un four à cycles alternés	16
Fig. I.5 : (a et b) exemples de fours à chaux verticaux	17
Fig. I.6 : Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif	18
Fig. I.7 : Schéma de principe d'un hydrateur à chaux.	20
CHAPITER II	
Fig. II.1 : Courbes granulométriques du sable	39
CHAPITER III	
Fig. III.1 : Effet de la poudre de fer sur les délais de prise	58
Fig. III.2 : Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 14 jours	60
Fig. III.3 : Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 28 jours	60
Fig. III.4 : Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 56 jours	61
Fig. III.5 : Résistance mécanique des mortiers à la traction par flexion	61
Fig. III.6 : Résistance mécanique à compression à l'âge 14 jours	63
Fig. III.7 : Résistance mécanique à compression à l'âge 28 jours	63
Fig. III.8 : Résistance mécanique à compression à l'âge 56 jours	64
Fig. III.9 : Résistance mécanique des mortiers à la compression	64

Liste des photos

CHAPITER II

Photo. II.1 : Chaux vive de Saida.	33
Photo. II.2: Mesure de la masse volumique réelle	34
Photo. II.3: Mesure de la masse volumique absolue	35
Photo. II.4: Détermination des délais de prise avec l'Appareil de Vicat	36
Photo. II.5: Sable d'Oued ZELFANA	36
Photo. II.6: Les tamis	38
Photo. II.7: échéante et balance	38
Photo. II.8: Agiter manuellement du tamis	39
Photo. II.9: Matériels de l'essai Masse volumique	41
Photo. II.10: Matériels de l'essai d'équivalent de sable	44
Photo. II.11: l'essai d'équivalent de sable	45
Photo. II.12: La poudre de fer	46
Photo. II.13: Grenailleuse (machine de projection abrasive)	48
Photo. II.14: Projection par air comprime de la grenailleuse	48
Photo. II.15: l'état final de du tube en acier après sortir du grenailage.	48
Photo. II.16: Abrasive d'acier (grenaille)	49
Photo. II.17: La poudre de fer	50
Photo. II.18: Les matériels utilisés	50
Photo. II.19: Les matériaux utilisés	51
Photo. II.20: Le mélange de la chaux	51
Photo. II.21: Le malaxage des mortiers	52
Photo. II.22: Coulage et Compactage des moules	53
Photo. II.23: démoulage	54
Photo. II.24: Conservation à l'aire libre	54
Photo. II.25: Conservation à une température ambiante au laboratoire	55
Photo. II.26: Essai de traction par flexion	55

Liste des abréviations explicitées

R_C	Résistance de compression
R_T	Résistance de traction
CaCO₃	Le carbonate de calcium
CaO	L'oxyde de calcium
Ca(OH)₂	L'hydroxyde de calcium
Kcal	kilocalorie
MgO	L'oxyde de magnésium
Mg(OH)₂	L'hydroxyde de magnésium
Fe₂O₃	L'oxyde de fer(III)
Al₂O₃	Oxyde d'aluminium
SiO₂	Dioxyde de silicium
SO₃	Trioxyle de soufre
H₂O	L'eau
CO₂	Dioxyde de carbone
Na₂O	L'oxyde de sodium
NaOH	L'hydroxyde de sodium
K₂O	L'oxyde de potassium
SO₃²⁻	Trioxyle de soufre
HCL	Chlorure d'hydrogène
C	Carbone
Si	Silicium
Mn	Manganèse
S	Soufre
P	Phosphore
V	Volume
P	Poids
M	La masse
Mv	Masse volumique
pa	Masse volumique absolue
ES	Equivalent de sable
ESV	Equivalent de sable à vue
ω	Teneur en eau

Table de matière

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Dédicas	
Remerciements	
Liste des tableaux	I
Liste des figures	II
Liste des photos	III
Liste des abréviations explicitées	IV
Table de matière	V
Chapitre I Etude bibliographique sur la chaux	
I.1.Introduction	5
I.2. Historique sur les mortiers de chaux	5
I.3. Définition de la chaux	7
I.4. Les différents types la chaux :	8
I.5. La différence entre chaux aérienne et chaux hydraulique	10
I.6. Fabrication de la chaux	11
I.6.1. Généralités	11
I.6.2 Fabrication traditionnelle	11
I.6.3 Fabrication industrielle	12
I.7. La cuisson de la chaux	12
I.7.1 Les fours traditionnels	13
I.7.2 Les fours verticaux	14
I.7. Les fours rotatifs	17
I.8. Conditionnement de la chaux	19
I.9. Contrôles qualité	21
I.10. Les caractéristiques des mortiers de chaux	21
I.11. La chaux et ses utilisations	22
I.11.1. Un liant pour bâtir et pour restaurer	22
I.11.2. En milieu ancien, un liant pour restaurer	23
I.11.3. Dans la sidérurgie et le traitement des métaux non ferreux	27
I.11.4. En chimie et dans le traitement des eaux	27
I.12. Conclusion	29

Table de matière

III.3 Résultats obtenus sur mortiers à l'état durcis.....	59
III.3.1 Résistance mécanique à la traction par flexion.....	59
III.3.2 Résistance mécanique à la compression.....	62
III.4 Densité des mortiers.....	63
III.4 Conclusion	66
Conclusion générale	68
Références bibliographiques.....	70
Les annexes.....	

Introduction générale

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 notre ère pour le badigeonnage et plus tard utilisé avec succès par les Grecs et les Romains comme mortier de construction et de décoration et traité le sol.

Aujourd'hui, ce matériau a été abandonné au profit du ciment, certes plus résistant, mais plus dur et moins adapté à la rénovation et à la restauration des constructions anciens.

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 construction ancien, permettant ainsi sa durabilité.

Nous proposons dans ce travail de recherche, d'ordre expérimental, de valoriser de la chaux, ce matériau écologique et authentique pour confectionner des mortiers d'enduit à base de chaux, de poudre de fer des déchets du nettoyage des tubes d'acier.

L'Algérie s'emploie à encourager les institutions publiques et privées à produire du fer et de l'acier afin qu'elles puissent atteindre l'autosuffisance en ce métal précieux et l'exporter à l'étranger, notamment après la mise en service de "Ghar Jbeilat" qui représente l'une des plus importantes réserves de fer au monde, et avec le grand nombre d'industries du fer, comme les tubes, il en résulte beaucoup de déchets de fer ferreux (poudre de fer).

Les mortiers de chaux en générale présentent des faibles résistances mécaniques limitant ainsi leur utilisation malgré la disponibilité de ce matériau dans notre région, d'autre part au niveau de certain unités industrielles notamment.

Introduction générale

L'entreprise ANABIB on trouve un déchet sous forme de poudre de fer, l'idée ici est d'étudier la possibilité d'améliorer un mortier de chaux par ajout de poudre de fer. Le projet d'un coté, cherche la valorisation d'un déchet industriel et d'un autre coté étudié l'amélioration d'un matériau de construction. 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.

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
Etude bibliographique
sur la chaux

I.1.Introduction :

Les problèmes propres au génie civil, ou aux arts de l'ingénieur, sont diverses : énergie, eau, pollution, santé. Les ingénieurs ont été et continuent d'être partie intégrante de la mise au point de nouveaux cycles de matières premières, produits et procédés, dans le respect des contraintes environnementales, sociales et économiques inhérentes aux trois principaux piliers du développement durable.

L'application de ce concept au secteur de la construction suppose que le choix d'un matériau de construction soit considéré non seulement en termes de performances et d'efficacité, mais aussi en termes de disponibilité sur la planète, d'innovation, d'origine proche, d'énergie impliquée dans sa développement (énergie exprimée), sa durée de vie, ainsi que la possibilité d'utiliser ensemble d'autres déchets non biodégradables, y compris son utilisation dans le béton, ont fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années.

La chaux est l'un des plus anciens liants existants pour mortier. Le mortier de la chaux aide à lier les éléments de maçonnerie entre eux, ainsi qu'à la production d'enduits à la chaux, de chapes, de peintures, etc.

Son utilisation a renoué avec les chantiers de restauration, car c'est un matériau dont les propriétés sont compatibles avec les exigences des bâtiments anciens et son utilisation offre des avantages, que ce soit en termes de construction, d'esthétique, d'histoire ou encore d'environnement.

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude bibliographique sur la chaux.

I.2. Historique sur les mortiers de chaux :

Les premiers mortiers étaient faits de boue ou d'argile. Ces matériaux ont été utilisés en raison de leur disponibilité et de leur faible coût. Les Égyptiens utilisaient du mortier de plâtre pour lubrifier de grandes couches de roche qui étaient déplacées pour les mettre en place. Cependant, ces matériaux ne sont pas très efficaces en présence d'humidité élevée et d'eau

Il a été découvert que le calcaire, lorsqu'il est brûlé et combiné avec de l'eau, crée un matériau qui durcit avec le temps. La première utilisation enregistrée de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 av. J.-C., lorsque les Égyptiens l'utilisaient pour plâtrer les pyramides, Le début de l'utilisation de la chaux dans le mortier est ambigu. D'autre part, nous savons que l'Empire romain utilisait la chaux dans le mortier. Marcus Vitruvius Pollio, mieux connu sous le nom de Vitruve, un architecte romain, a fourni des instructions pour la préparation du mortier de chaux [1].

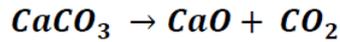
Un mortier contenant uniquement de la chaux et du sable a besoin de dioxyde de carbone dans l'air pour se reconvertir en calcaire et durcir. Le mortier de sable et de chaux prend lentement et ne prend pas sous l'eau. Les Romains ont créé des mortiers hydrauliques contenant de la chaux et des pouzzolanes telles que de la poussière de brique et des cendres volcaniques. Ces coulis sont destinés à des applications où la présence d'eau ne permet pas au coulis de se carboniser complètement. Des exemples de ce type d'application comprennent les réservoirs d'eau, les étangs à poissons et les aqueducs [10].

Les recherches se multiplièrent sur les procédés de cuisson de la chaux, sa nature, et surtout le secret de sa propriétés hydrauliques :

- 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) [3].

I.3. Définition de la chaux :

Le terme chaux est générique. Il rassemble un grand nombre de produits, le seul point commun étant obtenu par calcination, c'est-à-dire en chauffant le calcaire à haute température. Le processus de calcination décompose le carbonate de calcium $CaCO_3$, le composant principal du calcaire, libérant du gaz carbonique et laissant de la chaux vive CaO selon l'équation :



La chaux vive CaO Non utilisé directement car son hydratation s'accompagne d'un gonflement inacceptable de la structure, 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 :

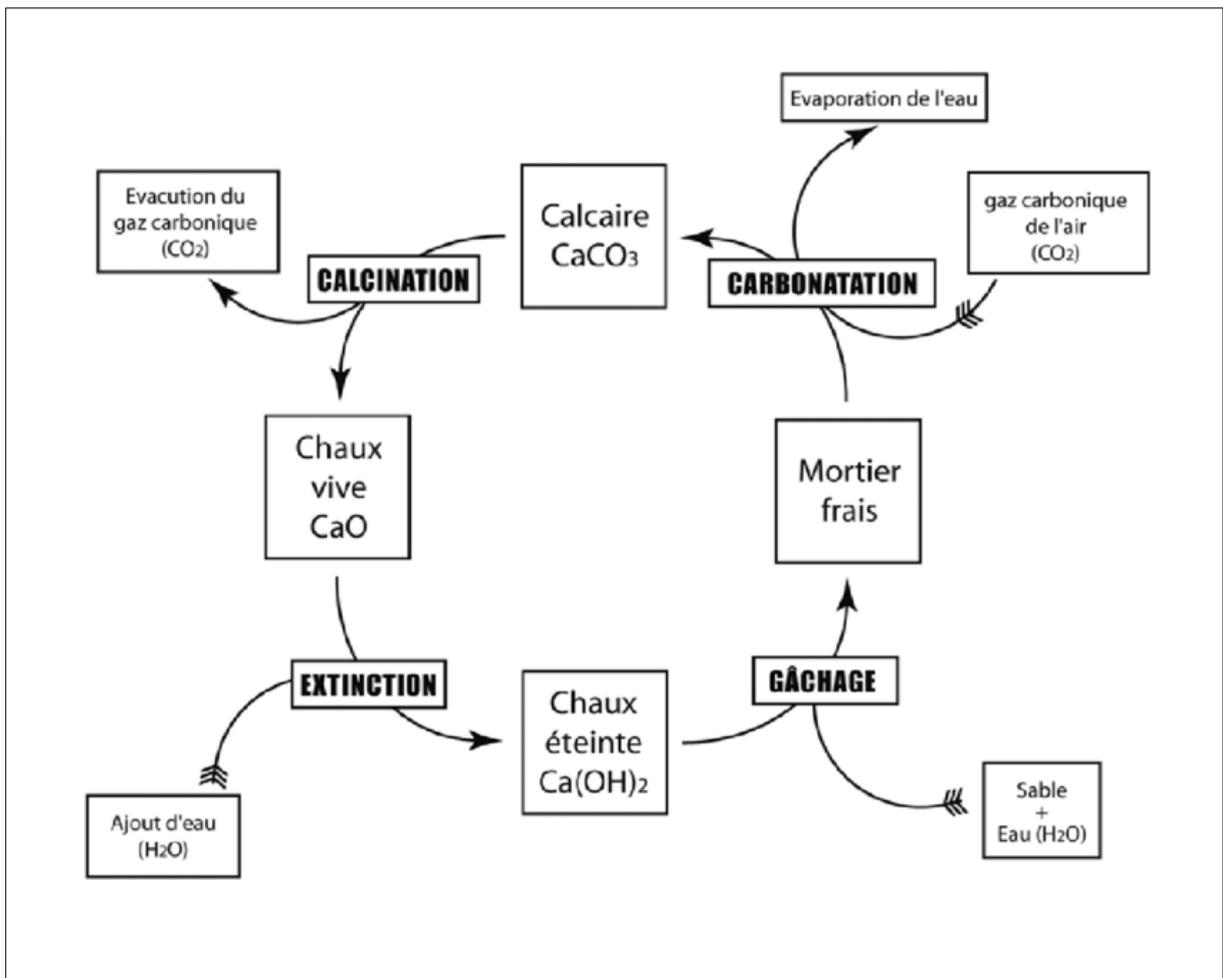
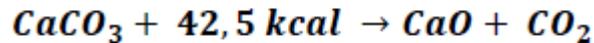


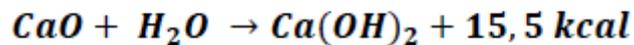
Figure I.1. Le cycle de la chaux (COUTELAS, 2005)

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

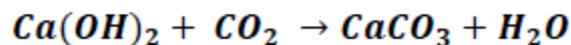


Il s'agit d'une réaction de décarbonations, La libération de dioxyde de carbone (CO₂) entraîne une perte de poids importante, jusqu'à 44 % de la masse d'origine. Cependant, le volume est toujours conservé. L'oxyde de calcium (CaO) restant est appelé "chaux vive". La chaux vive la plus réactive est obtenue après chauffage du calcaire à 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 :



La **carbonisation** est la dernière étape des transformations associées à la chaux. Elle se produit lorsque le mortier a été appliqué et que la chaux est exposée à l'air, puis le matériau durcit en reformant la calcite [6], 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 :



I.4. Les différents types la 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 :

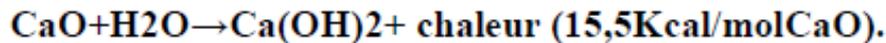
- La chaux vive, monoxyde de calcium, **CaO**.
- La chaux éteinte (ou hydratée), hydraulique ou aérienne. C'est un hydroxyde de calcium **Ca(OH)₂**.
- Les chaux dolomitiques (magnésiennes).
- Lait de chaux.

- **la chaux vive :**

Le carbonate de calcium doit être chauffé à une température très élevée (calcination ou brulage), pour former la chaux vive qui est principalement constituée de 90% d'Oxyde de calcium (CaO). Elle s'appelle aussi chaux brulée.

- **La chaux éteinte (ou hydratée) :**

Elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium **Ca(OH)₂**. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique:



- **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 en pâte hydratée 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.

- **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 XVIII^e 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 granulat réactif, « pouzzolanique ».

- **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.

- **Lait de chaux:**

Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sols présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achève au contraire de les dessécher)[3].

I.5. La différence entre chaux aérienne et chaux hydraulique :

La chaux hydraulique a la faculté de pouvoir faire sa prise dans un milieu humide, voire sous l'eau, **La chaux aérienne**, elle, fait sa prise au contact de l'air uniquement.

Le plus impressionnant est que tant qu'elle n'a pas eu ce contact avec l'air, elle peut garder sa forme pâteuse pendant des années voire des siècles avant de faire sa prise. C'est d'ailleurs un cas observable lors de fouilles ou de réfections de monuments romains, entre les pierres desquels, on retrouve fréquemment des zones où la chaux aérienne utilisée pour la construction était restée molle et fraîche" en attendant de pouvoir faire sa carbonatation à l'air.

I.6. Fabrication de la chaux :

I.6.1. Généralités

Parmi les paramètres influençant la calcination, citons : la nature de la roche, sa composition et les impuretés présentes, sa texture, sa cohésion... qui sont des éléments déterminants sur la cinétique de décarbonatation. De même, interviennent avec le type de combustible, la température maximale atteinte ainsi que la durée de cuisson, lesquelles agissent considérablement sur les phénomènes de recuit ou de frittage de la chaux. Notons aussi que la pression ambiante durant la cuisson, la présence de CO₂ et de vapeur d'eau – en proportions respectives adéquates - jouent un rôle important lors des phénomènes précédents [3].

I.6.2. Fabrication traditionnelle :

Pour charger le four, un brûleur à chaux pénètre dans l'ouverture inférieure, déposant 2 à 3 kg de blocs de calcaire pour former une fausse voûte, laissant un trou circulaire au centre pour le passage de la flamme. Les calcaires doivent être parfaitement calés car ils supporteront tout le poids.

Si la voûte 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 [3].

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 brûleur.

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].

I.6.3. 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 chauffournier. 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].

I.7. La cuisson de la chaux :

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 [7 ; 9], On retrouve une zonalité équivalente dans les fours rotatifs à ciments.

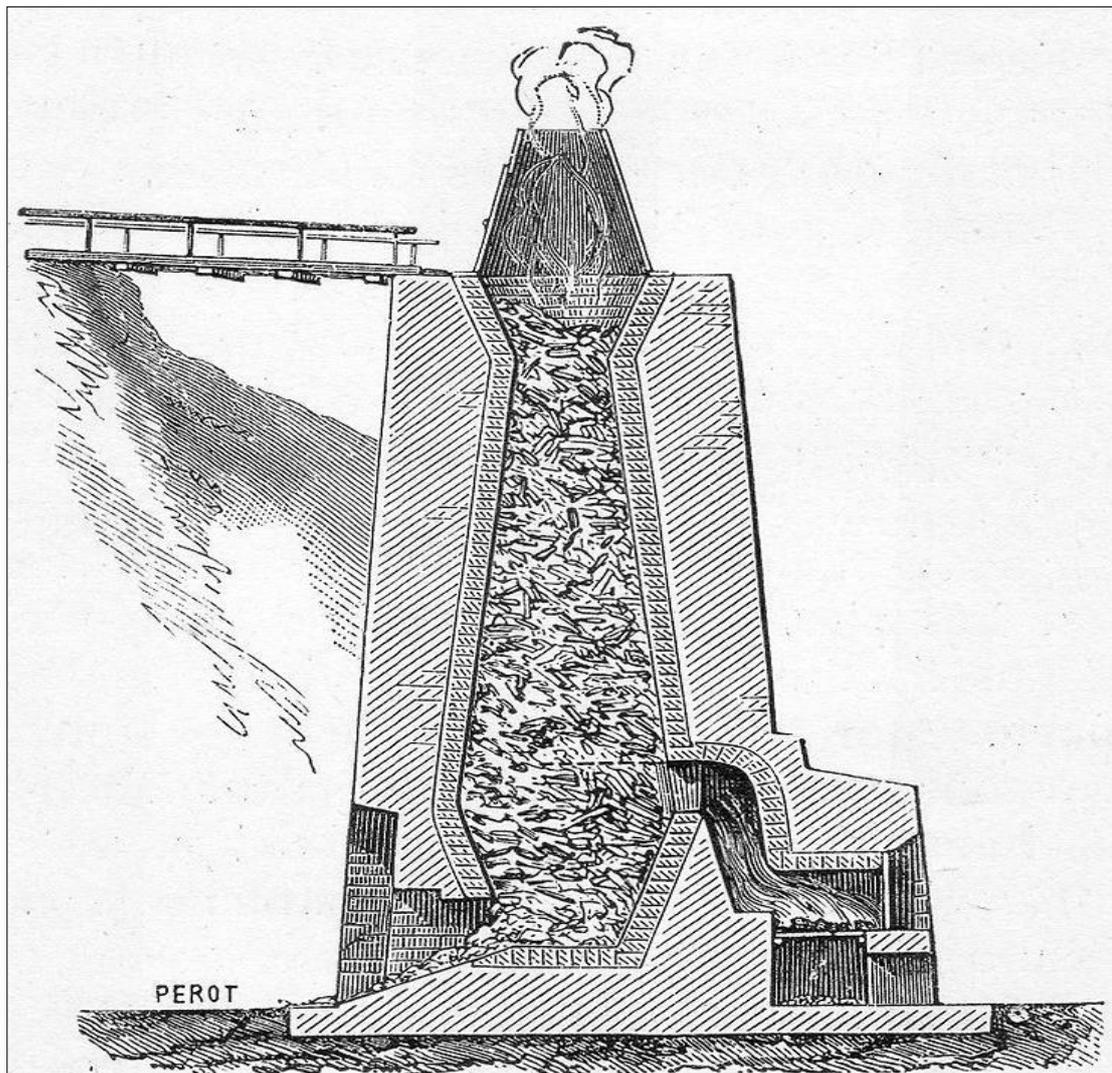
Dans les installations modernes, la cuisson se fait en flamme continu. Les parties exposées aux températures élevées sont généralement protégées par un garnissage de

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 [6].

I.7.1. 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 I.2). Les parois intérieures étaient recouvertes d'argile, de briques ou de pierres réfractaires, qui servaient à conserver et à isoler thermiquement le four [5].



**Figure I.2. Représentation schématique d'un four traditionnel
(B.BUSSARD, H.DUBOIS 1906)**

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 [5]. 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 [5].

I.7.2. Les fours verticaux :

La fabrication industrielle de la chaux a débuté avec ce type de fours. Ils étaient surtout destinés à traiter de gros calibres, l'échange de la réaction matière-chaleur y est appréciable. Ils peuvent travailler avec de petits calibres, mais le rendement diminue. Le temps de séjour moyen de la matière est de l'ordre de 24 heures. Il existe plusieurs variantes dénommées :

Fours à cuve (ou fours droits), fours annulaires (ou Warmestelle) et fours à flux parallèles. Les deux premiers peuvent être regroupés par batteries de quatre [8].

Dans ces fours, 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 évoquées plus haut : 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. (Figure I.3).

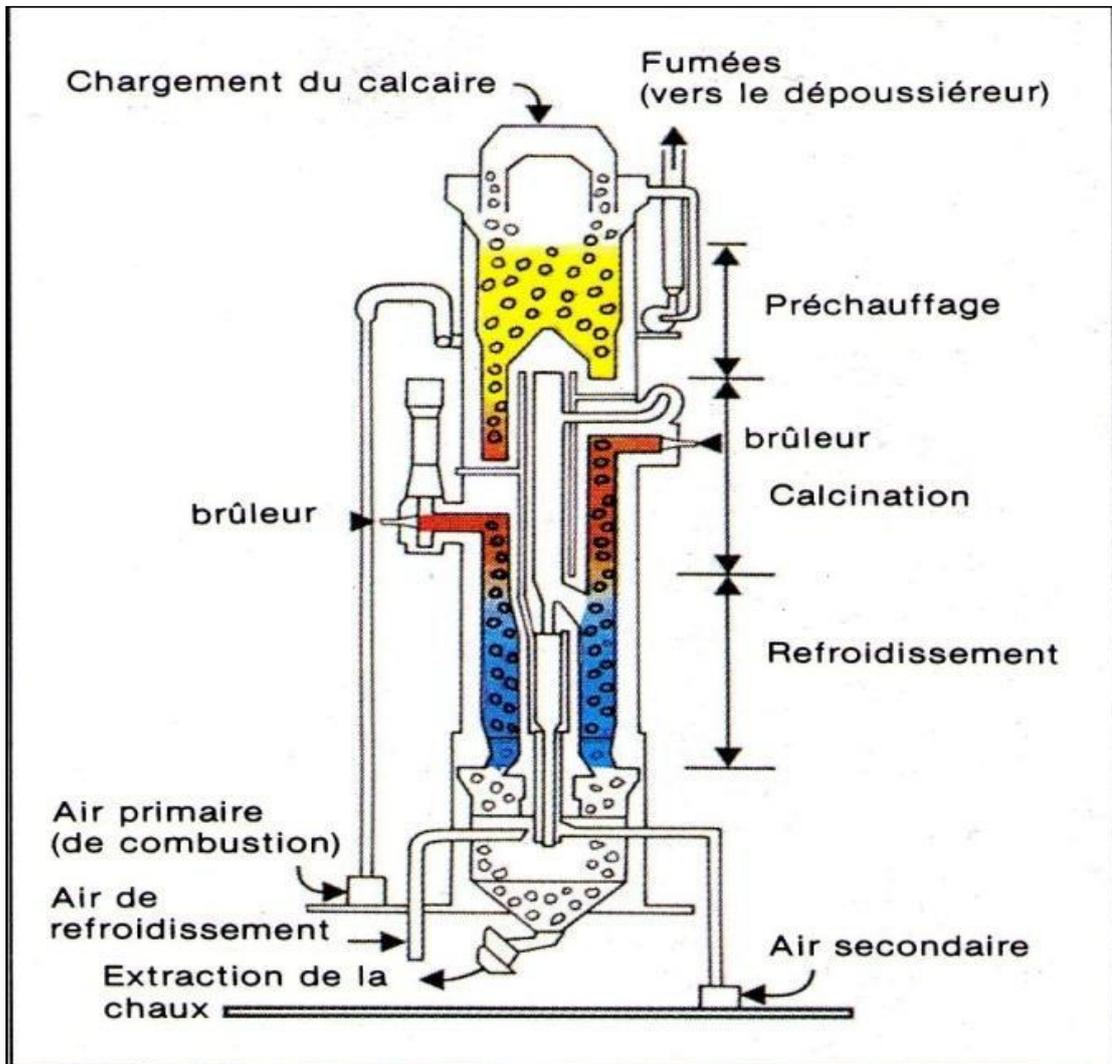


Figure I.3. Schéma simplifié d'un four vertical (CLAUDE, 1994)

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. Les fours modernes, qui permettent de grosses productions allant jusqu'à 600 t/jour et plus, utilisent le fuel ou le gaz naturel. Ces combustibles sont alors injectés par des lances aux deux tiers environ de la cuve ; ils s'enflamment et provoquent ainsi la combustion nécessaire dans la zone de chauffe de la cuve. Ce procédé, mis au point et constamment amélioré par la nature du combustible et son mode d'introduction, a l'avantage de répartir de façon homogène le combustible, et donc la chaleur dégagée par sa combustion, dans la masse de calcaire. Le bilan énergétique de l'opération s'en trouve nettement amélioré (moins de 1000 thermies par tonne produite), un minimum de calories étant ainsi perdu. La

qualité de la chaux s'en trouve également améliorée du fait de la plus grande homogénéité de la cuisson [7].

Il convient de signaler l'existence de variantes à ces fours verticaux parmi lesquelles le four à cycles alternés (figure I.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.

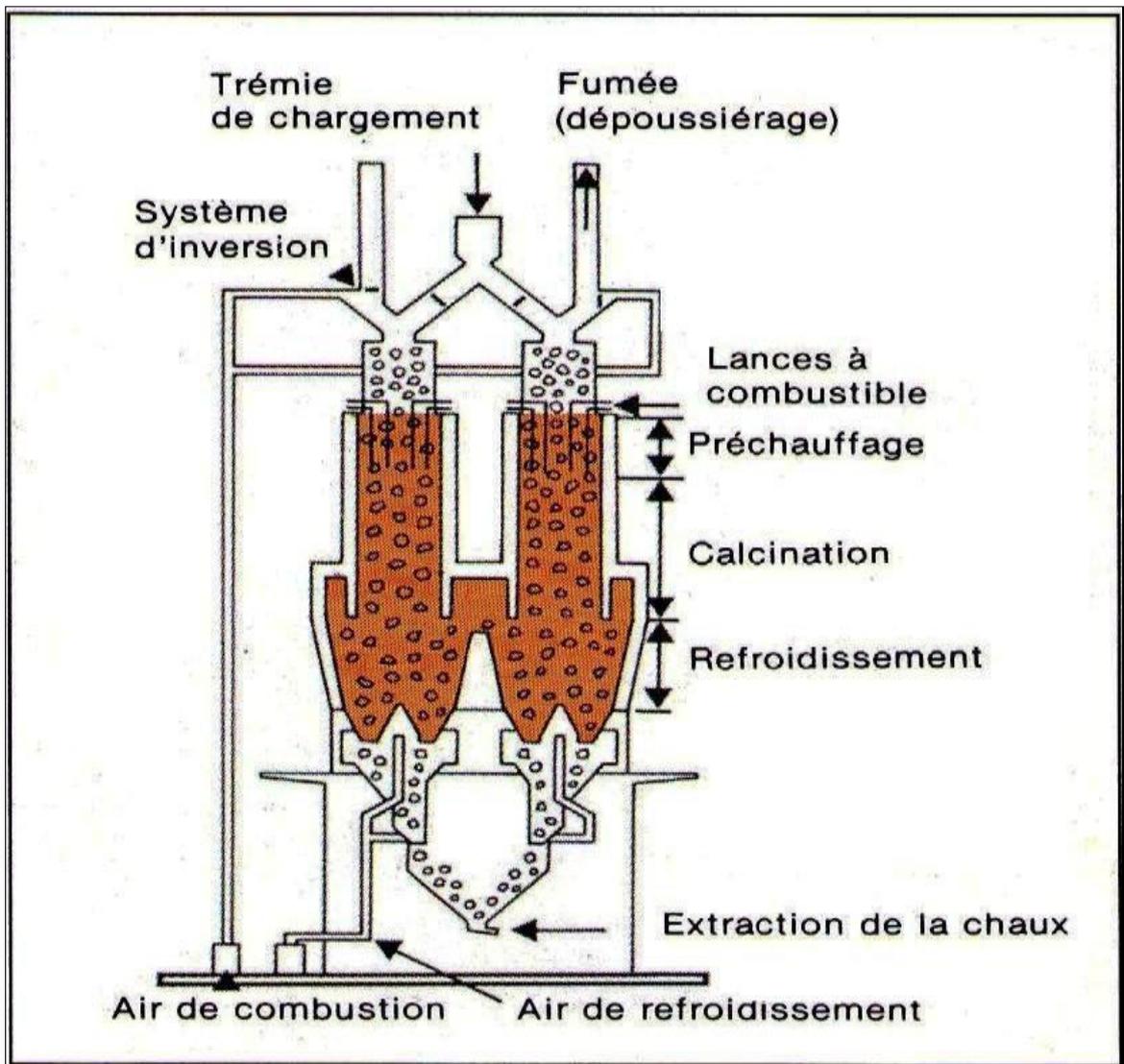


Figure I.4. Schéma simplifié d'un four à cycles alternés (CLAUDE, 1994)

La charge est, avant tout, cuite suivant un flux parallèle et l'air de combustion est préchauffé par récupération. Un tel processus de cuisson est possible grâce au concours d'au moins deux cuves, dont le chauffage et le courant gazeux sont périodiquement inversés. Les

fours du fabricant **Mears**, parmi les plus performants actuellement, sont de ce type. Ces modèles ainsi que les fours annulaires sont les plus fréquemment rencontrés, (Figure I.5 a et b).

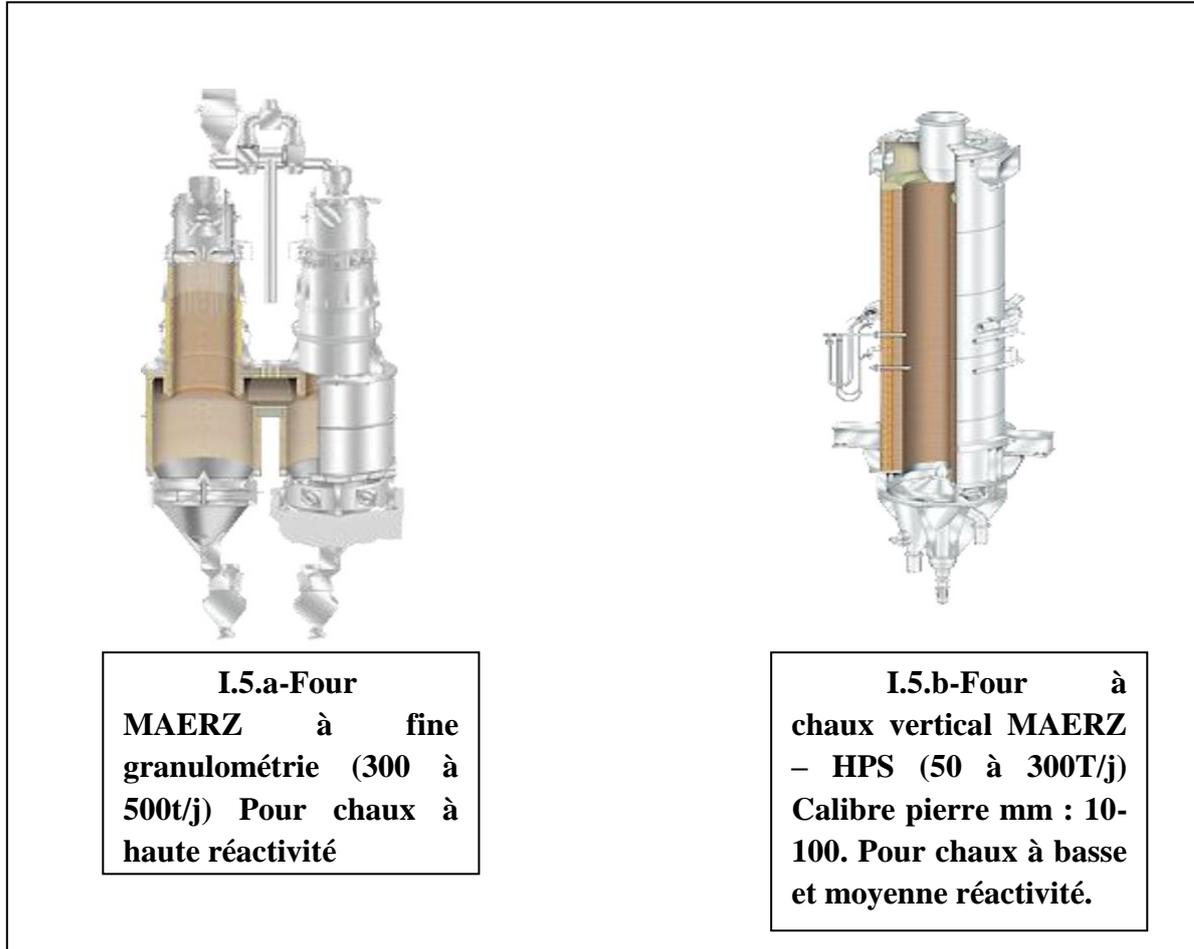


Figure I.5 (a et b). exemples de fours à chaux verticaux (MAERZ)

I.7.3. 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. 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 (Figure I.6).

Contrairement aux fours verticaux qui ont un enfournement et un défournement discontinus, le processus d'approvisionnement des fours rotatifs est entièrement continu. Le temps de séjour y est de l'ordre de 6 à 8 heures [8].

Les fours rotatifs ont les avantages suivants :

- Des capacités de production élevées (plus de 1500t/jours),
- la possibilité d'utiliser de petits calibres de minerai moins gênants que dans les fours verticaux,
- une souplesse d'utilisation dans la capacité de production, et une meilleure adaptation à la production de qualités spéciales.

Par contre, leurs rendements caloriques sont moins bons (≥ 1200 thermies/tonne produite).

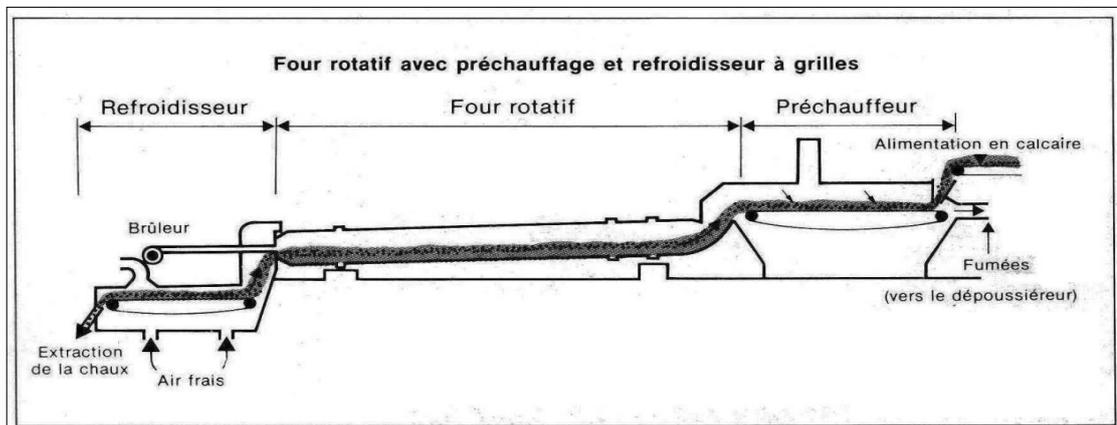


Figure I.6. Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif (CLAUDE, 1994)

- **Autres types de fours:**

Nous citons pour mémoire l'existence d'autres types de fours, beaucoup moins répandus que les précédents, comme les fours type « Calcimatic » à soles tournantes ou les fours « cascades », allusion faite à la descente du minerai par paliers de cuisson...

D'une manière générale, de nos jours les fours à chaux font l'objet d'améliorations continues afin d'augmenter leurs performances et de les adapter à une production de plus en plus variée.

Pour résumer, le tableau ci-après (Tableau I.1) résume les principales caractéristiques des fours les plus répandus.

Tableau. I.1. Types et tailles de fours à chaux en service en U.E (BREF-2006) avec granularité des pierres à l'alimentation

Types de fours	Nombre de fours	Production (T/j)	Granularité. Alimentation (mm)
Four long rotatif (LRK)	26	160-1500	2-60
Four rotatifs avec préchauffeur (PRK)	20	150-1500	10-60
Fours verticaux à cycles alternés (PFRK)	158	100-600	10-200
Four annulaire (ASK)	74	80-300	10-150
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	116	60-200	20-200
Autres fours	203	10-200	20-250
Total	597	-	-

Remarque :

Il convient également de rappeler que la bonne conduite de la calcination du calcaire nécessite les connaissances les plus complètes possibles :

- de la pierre,
- de l'outil de cuisson et de son combustible,
- du mécanisme de décarbonatation,
- des tests de caractérisation des produits...

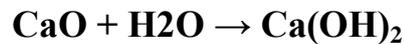
I.8. Conditionnement de la chaux :

A l'aval du four, diverses opérations sont menées :

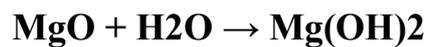
- **Criblage**, permet de calibrer la chaux vive sortie four en différentes granulométries :
 - Fraction **roches** > 20 mm.
 - Fraction 5 mm < **grains** < 50 mm.
 - Fraction **fines** < 5 mm.

Ces chaux peuvent être commercialisées telles quelles, ou acheminées vers les ateliers de broyage ou d'hydratation.

- **Broyage**, certaines applications nécessitent des calibres plus fins. On parle de « chaux broyée » (< 2 mm), ou « pulvérisée » (< 200 µm), ou « moulue » (< 90 µm) selon la granulométrie finale.
- **Hydratation**, elle s'opère selon la réaction :



Ou la réaction :



Industriellement, cette réaction est mise en œuvre dans un réacteur appelé « hydrateur » où chaux et eau sont mises en contact (Figure I.7). L'hydratation est dite par voie sèche ou par voie humide [7].

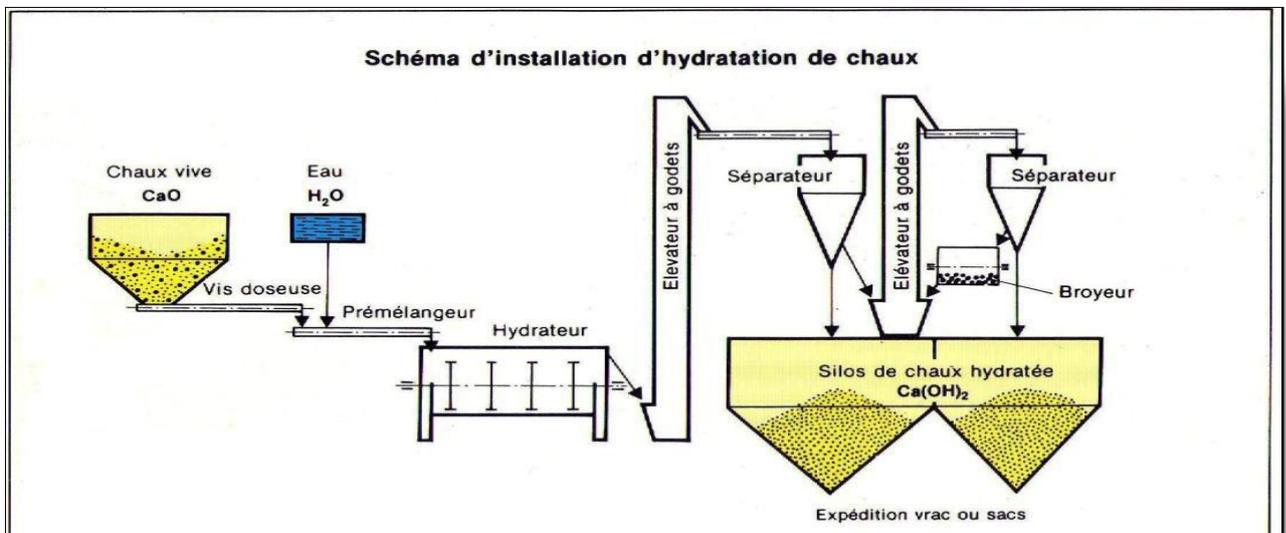


Figure I.7. Schéma de principe d'un hydrateur à chaux (CLAUDE, 1994)

Dans l'hydratation par voie sèche : la chaux vive, de calibre inférieur à 10 mm avec une quantité d'eau suffisante et, au besoin ajustée, pour assurer l'hydratation et l'évacuation de la chaleur dégagée par la réaction, sont introduites dans l'hydrateur. Certaines particules de chaux ne réagissent pas à l'hydratation : il peut s'agir d'impuretés, mais aussi de particules de calcaires non transformés en chaux vive (les « incuits ») ou inversement des particules de chaux vive trop

cuite (les «surcuits »). Cet ensemble forme ce qui appelé le « grappier » qui est éliminé après broyage de ses éléments grossiers. A la sortie de l'hydrateur, la chaux éteinte est introduite dans un sélecteur où elle subit une sélection granulométrique [8].

Dans l'hydratation par voie humide : la chaux vive est hydratée avec un excès d'eau, on obtient soit de la pâte à chaux, soit du lait de chaux lorsque la concentration en matière sèche est inférieure à 45 %. La pâte à chaux peut être obtenue par hydratation de chaux en roche. Le lait de chaux peut découler de la mise en suspension de la chaux hydratée dans l'eau. Dans tous ces cas de préparation la qualité de l'eau utilisée est primordiale [8].

I.9. Contrôles qualité :

Ils sont nécessaires, depuis la carrière, afin d'assurer une qualité constante au niveau des impuretés.

- La qualité de la chaux vive est essentiellement caractérisée par :
 - ✓ Sa réactivité ou vitesse d'extinction à l'eau ;
 - ✓ Son degré de cuisson avec la teneur en CO₂ résiduel ;
 - ✓ Sa teneur en CaO actif.

- La qualité de la chaux hydratée est caractérisée par :
 - ✓ Sa finesse ;
 - ✓ Sa stabilité (absence de chaux vive) ;
 - ✓ Sa pureté [CO₂ résiduel, Ca(OH)₂].

Bien qu'étant une réaction très simple, la décarbonatation du calcaire est un processus complexe de par le grand nombre de paramètres, tant physiques que chimiques et thermiques, susceptibles d'influencer son déroulement et modifier les propriétés du produit final [8].

I.10. Les caractéristiques 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 [18].

I.11. La chaux et ses utilisations :

La chaux entre dans un grand nombre d'utilisations, depuis des applications artisanales jusqu'à des processus industriels très évolués.

La production française en 2001 est de 2 480 000 tonnes, dont une part importante est fabriquée par les utilisateurs eux-mêmes dans le cadre industriel (en particulier dans les secteurs de fabrication solide, de la chimie).

I.11.1. Un liant pour bâtir et pour restaurer :

L'utilisation de la chaux, dans le bâtiment comme matériau de construction, représente moins de 3 % de la production totale française de chaux aérienne ou magnésienne. (Si l'on considère seulement la chaux sous sa forme éteinte, ce pourcentage représente un peu plus de 10 % : ainsi l'usage de la chaux dans le bâtiment reste relativement modeste).

Certains débouchés ne sont pas pratiqués en France, mais existent à l'étranger. C'est le cas de la brique silico-calcaire, fabriquée à partir d'un mélange de chaux et de sable siliceux, compacté et étuvé.

Il faut signaler également les bétons cellulaires (à base de mortier de sable, de chaux et /ou de ciment), qui résultent de l'action de la chaux sur de l'aluminium en poudre (dégagement de bulles de gaz).

D'autre part, la fabrication du verre, matériau de plus en plus présent dans l'architecture contemporaine, nécessite l'adjonction en faible quantité de calcaire (souvent sous forme de chaux) dans un mélange essentiellement à base de silice ou de quartz [17].

Depuis fort longtemps, la chaux a été employée pour stabiliser les routes et chemins. Son utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques physiques du sol. Comme en agriculture, elle sert à diminuer le pourcentage d'eau contenu dans un sol humide, et à flocculer les argiles du sol provoquant ainsi une réaction physico-chimique et permettre le passage d'une structure plastique à une composition stable, grumeleuse. (chaux vive ou chaux éteinte). Cet usage connaît ces dernières années une croissance justifiée par des critères environnementaux ; la chaux étant alors considérée comme « matériau naturel ».

Elle sert aussi à modifier les caractéristiques chimiques du sol. Ainsi elle agit pour solubiliser la silice et l'alumine contenues dans l'argile et former un silicate et aluminat de calcium. La chaux intervient dans la composition d'un liant hydraulique, qui agglomère les composants du sol et en augmente la dureté.

Cette propriété est aussi utilisée pour la stabilisation de la terre, compactée ou non, destinée à la construction d'habitat en terre crue.

I.11.2. En milieu ancien, un liant pour restaurer:

Le gros consommateur de chaux est aujourd'hui le secteur de la réhabilitation. La redécouverte de ce fond urbain accompagne la revalorisation de l'artisanat, pris ici au sens du sur mesure et de la petite entreprise.

Viviers de savoir-faire et de tours de main, le milieu des métiers trouve ici un nouveau souffle où il peut donner la mesure de sa richesse et de son identité. Chaque enduit mobilise chez le maçon sa capacité circonstancielle à s'adapter à une demande particulière, par référence à un modèle traditionnel. Chaque fois que le dernier ravalement est antérieur aux liants industriels, la chaux est le matériau employé. C'est dire qu'elle domine en milieu ancien et qu'elle est, par excellence, le matériau d'entretien des parements.

Si l'entretien est un marché, il est aussi une discipline. Il suppose une intervention en continuité avec la vie de l'édifice qui propose, encore visibles, les traces de son architecture. Il pose la double question du traitement et de la technique. Il pose enfin la question des marques du temps et du choix éventuel de leur maintien à titre de témoin.

Le traitement touche à la composition et à l'aspect : il ne peut s'affranchir d'un contexte patrimonial et effleure nécessairement les principes de la restauration.

Dans le cas de l'intégration d'un enduit, pour partie conservé et pour partie refait, quels choix esthétiques prévalent ? La prolongation à l'identique au nom de l'unité ? L'accentuation de la différence au nom de la lisibilité ? Dans le cas du remplacement de l'enduit, cherche-t-on l'équivalence d'aspect par des artifices de patine et de vieillissement ou bien la réfection à neuf se substitue-t-elle à bon compte à l'ouvrage ancien ?

Ces interrogations attestent que la réhabilitation, si elle tolère plus facilement le renouvellement des ouvrages, n'échappe pas à la question de l'aspect, à la combinaison du beau et du vieux.

Le souci du « vieux », de la marque du temps, est curieusement à la fois revendiqué et repoussé. Refaire, par référence à l'architecture, et conserver, par référence à l'ancienneté, procèdent de deux esthétiques différentes : celle de la forme et celle des marques de l'histoire.

Au-delà de ces débats, la chaux convient à l'entretien. Elle sait révéler l'agrégat des enduits et elle est lumineuse ; elle flatte l'imperfection du mur ; elle est veloutée et nuancée dans les badigeons ou les eaux fortes, presque transparente dans les patines. Sur le plan technique, en entretien, l'ouvrage a lui aussi sa propre logique du support à la finition. Que vaut un épiderme « à l'ancienne », satisfaisant sur le plan visuel, s'il n'est pas compatible avec le derme-support ? Sur nombre d'édifices, on voit se dégrader à court terme la couche de finition réalisée à la chaux et appliquée sur un corps d'enduit de type moderne par le liant et par le dosage.

L'usage du matériau traditionnel exige un dispositif traditionnel. Toute conception technique de juxtaposition neuf/ancien devra tenir compte de cette évidence si elle veut employer la chaux autrement que comme un alibi d'habillage.

Cette conception technique est largement développée dans les chapitres suivants, elle se résume en :

- résistance des liants chaux compatible avec les matériaux de hourdages anciens (pierres, briques, terre) ;

- grande porosité des mortiers obtenus qui amène le maçon à parler de « respiration des murs ».

Avec la chaux, aspect et technique se superposent pour entretenir l'édifice et l'accompagner dans une sorte de fondu enchaîné du bâtiment dans le temps. côté de la logique de l'homme de métier, utilisateur d'un matériau brut qu'il façonne lui-même, s'est développée une offre considérable dans la logique du produit, à travers les enduits prêts à l'emploi. La chaux y est présente en quantité importante et ces produits résultent de l'image traditionnelle de l'enduit. Ils sont l'alternative industrielle à un ouvrage dont la culture est du domaine artisanal. Le chapitre sur les enduits présente les caractéristiques.

Le monde de l'entretien et le monde des monuments historiques diffèrent par leur approche.

Aujourd'hui, une piste de réflexion voudrait moins de confusion entre le monumental, l'œuvre au sens de chef-d'œuvre (exceptionnelle par sa qualité, son ambition et, généralement, son unité dominante) et les œuvres de construction traditionnelle, dignes d'intérêt par les marques de leur ancienneté. la première catégorie s'appliquent les disciplines de la conservation et de la restauration ; à la seconde, celles de l'entretien et de la réhabilitation. Études au cas par cas, débats de doctrine et de projet pour les premiers ; stratégies reproductibles et normalisables pour les seconds. En effet, en réhabilitation, le modèle préexiste généralement et, par analogie, en plusieurs exemplaires. Ici, réparation, entretien, réfection mobilisent l'arsenal courant des matériaux traditionnels, des techniques et savoir-faire des métiers. Quand bien même elle concourt à un objectif patrimonial, l'intervention y est de type sanitaire ; édifié, le bâtiment donne déjà à voir le traitement de son architecture et l'intervention échappe aux débats de doctrine.

En conservation, les approches sont tout autres, et la réfection n'est, en principe, qu'exceptionnelle. Dans le cas des ouvrages comportant un liant chaux, deux groupes de problèmes concrets se posent : perte de cohésion et perte d'adhésion. On rencontre ces désordres dans les mortiers de hourdage, dans les enduits, dans les couches picturales et l'on cherche à redonner à l'ouvrage ses propriétés perdues de tenue et de solidité. Du fait des principes de la discipline et de la qualité des œuvres à traiter, on tend vers une recherche de réversibilité des systèmes consolidant à laquelle on ne parvient qu'assez théoriquement.

Une gamme de procédés à partir de liants synthétiques, organiques, minéraux permet de résoudre les désordres d'adhésion et de cohésion. L'argument du choix se fait sur la base des contraintes du milieu (humidité, température, nature des sels et des pigments), mais surtout en fonction du projet final de traitement et des possibilités de déposer ou non l'ouvrage pelliculaire. Les chaux sont utilisées en injection, toujours en mélange avec d'autres produits adjuvants, et n'ont pas de qualité de réversibilité. Elles agissent, en revanche, par adhésion, en sympathie avec un milieu qui est, à l'origine, le leur. D'autres systèmes utilisent l'imprégnation et obtiennent une réversibilité de qualité variable par l'usage possible de solvants. Se pose enfin le problème du ré-enduit et du repeint sur les zones traitées ou à proximité. Le choix du système consolidant devra être compatible avec le traitement technique final qui utilisera des principes modernes ou traditionnels.

C'est donc bien le projet de restauration, définitif ou capable de repentir, qui guide le protocole d'intervention. La chaux n'y est pas un matériau retenu a priori et propre à répondre à chaque fois, mais un des composants à la disposition du restaurateur.

Pour les enduits, comme pour les peintures à la chaux, les architectes restaurateurs français s'en tiennent aux formules traditionnelles à base de chaux aériennes ou hydrauliques naturelles. Ils marquent en général une préférence pour les adjuvants les plus anciennes (sel d'alun, huile de lin...). D'une manière plus générale, l'inspection des Monuments historiques connaît le rôle d'exemplarité que ses propres choix jouent sur le patrimoine majeur, sur le patrimoine modeste ou non protégé. Reconnaisant la fonction de protection des maçonneries par le décor peint, elle considère que sa conservation ou sa restauration s'impose. Elle envisage cette opération dans une logique d'homogénéité, sachant que l'absence partielle de décor risquerait « d'inverser la hiérarchie des valeurs et de brouiller la lisibilité, la compréhension », précise Colette di Matteo. Son interrogation ressemble à une profession de foi : « L'édifice vivant utilisé peut-il se passer du décor protecteur nécessaire à sa maintenance, à son fonctionnement et à son entretien quotidiens ? »

Pour l'entretien, on a vu que c'est le dispositif technique traditionnel qui convient : les chaux y ont leur place naturelle. On sait aussi que l'enduit et son peignage sont tout autant protections indispensables que prétextes à décor, réunissant dans un ouvrage unique l'organe constructif et le signe architectural. On peut en déduire que les chaux, comme « chef de

famille » des liants minéraux traditionnels, sont bien le matériau approprié à l'ouvrage en raccord et en réfection sur le patrimoine bâti.

Leurs qualités d'aspect les protègent des matériaux plus secs, plus plats ou trop uniformes, au moins tant que notre sensibilité tient leurs caractéristiques pour les plus belles. Elles ne sont pas cantonnées à l'entretien du patrimoine mais possèdent des ressources qui augurent bien de leur avenir [17].

I.11.3. Dans la sidérurgie et le traitement des métaux non ferreux

La sidérurgie est un domaine où l'emploi de la chaux intervient très largement. Elle a le pouvoir de réagir à haute température avec les impuretés des métaux et participe ainsi à leur affinage. La chaux est employée :

Dans les convertisseurs produisant de l'acier, à partir de la fonte (fer et carbone). La chaux vive forme avec les impuretés (silicium, phosphore, soufre) des scories, plus faciles à isoler et à éliminer. Les procédés actuels demandent 60 à 70 kg par tonne d'acier. La chaux éteinte (en poudre ou en pâte) a plusieurs fonctions : comme lubrifiant pour le tréfilage de l'acier, comme revêtement dans les moules utilisés pour la fusion en lingots de l'acier (évite le collage), mais aussi comme protection temporaire contre la corrosion.

Dans le traitement des métaux non ferreux, où elle sert d'agent d'attaque de la bauxite, pour en extraire l'aluminium, par enlèvement du silicium, puis pour la caustification.

Dans la préparation du magnésium par précipitation de la magnésie hydratée, à partir d'une solution de chlorure de magnésium.

Dans la séparation par flottation de différents sels métalliques, tels que le calcium métal, le cuivre, le zinc, le plomb, l'or, l'argent et l'uranium [17].

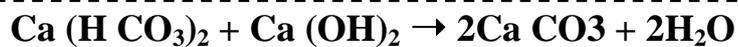
I.11.4. En chimie et dans le traitement des eaux

Produit de base de l'industrie chimique, la chaux provoque la désulfuration des fumées, par absorption des gaz acides, comme le dioxyde de soufre, le gaz carbonique...

Elle a été largement utilisée dans le processus de traitement des eaux, pour la neutralisation des eaux acides provenant de forêts et de tourbières.

L'opération consistait à leur faire traverser un bassin contenant de la chaux. Actuellement, celle-ci joue un rôle important et intervient à plusieurs niveaux :

- pour corriger l'acidité des eaux ;
- pour coaguler et flocculer les matières en suspension ;
- pour précipiter certains éléments toxiques et nuisibles ;
- pour stériliser (destruction des germes pathogènes) ;
- pour décarbonater les eaux, en précipitant le carbonate de calcium des eaux calcaires.



Bicarbonate + chaux → Carbonate + eau

(Soluble)

(Insoluble)

Ces applications dans le secteur de la protection de l'environnement sont nombreuses, on peut citer le traitement des : – Gaz de combustion (élimination des anhydrides sulfurés SO₂ et acide chlorhydrique HCl, élimination du mercure).

- Eaux potables (adoucissement, contrôle du pH, contrôle du développement des agents pathogènes, élimination des impuretés).
- Eaux de vidange, des effluents industriels.
- Boues de stations d'épuration.

Pour le secteur de la chimie, on retrouve la chaux dans de nombreux procédés industriels (production des alcalis avec le procédé soude-chaux, production de l'acide citrique, de la magnésite, des hypochlorites de calcium...) mais aussi pharmaceutique (production des phosphates de calcium, des fluorures, bromures...) [17].

- **Les autres utilisations de la chaux:**

La chaux n'intervient pas seulement dans le domaine de la construction. Compte tenu de son rôle, prééminent au sein des processus de transformation et de traitement, elle trouve

des usages très divers en relation avec ses propriétés chimiques et physiques. Elle peut être utilisée vive ou éteinte selon les usages suivants :

- ✓ Dans l'agriculture.
- ✓ Autres utilisations (dans médecine, dans les sucreries, dans l'industrie papetière, les tanneries ...etc.) [17].

I.12. 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 fer 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, Elle est fabriquée à partir de la calcination du calcaire, un processus qui consiste à chauffer le calcaire à des températures élevées, En ce qui concerne les utilisations, la chaux est largement utilisée dans la construction pour ses propriétés de liant et de stabilisation. Elle est utilisée pour la fabrication de mortiers, de bétons, d'enduits et de peintures. La chaux est également utilisée dans l'agriculture pour améliorer la qualité des sols et ajuster leur pH. Elle peut être utilisée comme désinfectant dans certaines industries, et elle joue également un rôle dans la métallurgie et la production de verre.

Chapitre II

Partie expérimentale

II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré aux caractérisations des matériaux utilisés dans cette étude. Nous présentons également une approche choisie pour la formulation du mortier. Enfin, nous présentons les différentes méthodes pratiques sur lesquelles s'appuie ce travail expérimental pour étudier l'effet de l'ajout de la poudre de fer sur les propriétés des mortiers de chaux.

On présente les différents matériaux utilisés pour fabriquer le mortier à étudier, ainsi que les essais effectués selon les normes et procédures en vigueur.

Les détermination des propriétés des matériaux entrant dans la composition du mortier jouent un rôle très important pour connaître les performances du mortier ultérieures.

II.2. Principe de la méthode de recherche :

Dans notre travail nous avons adopté un protocole purement expérimental, L'approche de formulation qui a été choisi dans ce travail est qui préconise une composition des mortiers de chaux avec constantes dosages de sable et l'eau pour un dosage de chaux, donc le principe de notre travail est de fixer tous les dosages et changer un seul dosage qui est celui de la poudre de fer qui est le sujet de notre recherche « Etude d'amélioration des caractéristiques physique et mécaniques d'un mortier de chaux par ajout de poudre de fer », donc on a étudié cinq formulations à savoir : 0%, 2%, 5%, 8%, et 15 % d'ajout de poudre de fer, et Les cinq formulations ont été caractérisés à l'état durci (RC, RT) et cela pendant les périodes 14 jours, 28 jours, 56 jours.

Le seul paramètre changé est le dosage de la poudre de fer.

Pour notre projet nous avons utilisé une poudre de fer ramené de l'unité de production des tube (ALFAPIPE) à Ghardaïa.

II.3. Les essais réalisés dans la cadre de notre étude :**II.3.1 Les essais sur sable :**

- Analyse granulométrique.
- Masse volumique (apparent et absolue).
- Equivalent de sable.

II.3.2 Les essais sur mortier frais :

- Délais de prises des mortiers de chaux.

II.3.3 Les essais sur mortier durci :

Les mortiers que préparés au laboratoire à base des différentes de dosage de poudre de fer ont fait l'objet d'un programme d'essai pour déterminer certaines performances de mortier à savoir:

- Essai de la résistance à la compression simple à 14 ; 28 et 56 jours.
- Essai de la résistance à la traction par flexion à 14 ; 28 et 56 jours.

Nous analyserons les résultats obtenus et fournirons des explications et des comparaisons entre différents dosages de poudre de fer sur caractéristiques physique et mécaniques d'un mortier de chaux et donnons des conclusions et des recommandations, Donc notre étude expérimentale se divise en trois parties :

1. Identification et caractérisation des matériaux utilisés.
2. Etude de formulation de cinq mortiers, et préparation des échantillons de mortier pour chaque type.
3. Réalisation des essais sur mortiers frais et mortiers durci sur les échantillons préparés.

En fin la préparation et l'interprétation des résultats et les conclusions.

II.4. Caractérisation des matériaux utilisés :

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.

II.4.1 La chaux :

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-ouest du territoire national) (Photo. II.1), Les différentes caractéristiques chimico-physiques de la chaux sont données dans les tableaux (Tableau. II.1 et Tableau. II.2)



Photo. II.1. Chaux vive de Saida (LTPS)

Tableau. II.1. Caractéristiques chimiques (SARL. BMSD)

Paramètres	Valeur (%)
CaO	67,4 à 73,25
MgO	<0,4
Fe ₂ O ₃	<2
Al ₂ O ₃	<1
SiO ₂	<2,2
SO ₃	<1
Na ₂ O+K ₂ O	<0,4
CO ₂	<5
CaCO ₃	<10
Ca (OH) ₂	>80
Insoluble dans HCL	<0,35

Tableau. II.2. Caractéristiques physiques (SARL. BMSD)

Paramètres	Valeur spécifique
Densité	<500 g/l
Constance volumique	Bonne
Poids spécifique	2,26 g/cm ³
H ₂ O d'hydratation	19,46 à 23,29
Refus 630 μ	0 %
Refus 90 μ	10,00 %

II.4.1.1. Masse volumique réelle (NBN EN 1015-6) :

La masse volumique réelle de la chaux 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 (Photo. II.2). Selon la norme NBN EN 1015-6 (NBN EN 1015-6, 2007), le mode opératoire dépend de la valeur d'étalement.



Photo. II.2. Mesure de la masse volumique réelle (LTPS)

Les résultats de l'essai la masse volumique réelle de la chaux est suivant :

Volume du récipient $V=2000 \text{ cm}^3$; Poid $T=1810 \text{ g}$

$$P_1+T= 3082 \text{ g} \qquad P_1= 1272 \text{ g}$$

$$P_2+T= 3074 \text{ g} \qquad P_2= 1264 \text{ g}$$

$$P_3+T= 3081 \text{ g} \qquad P_3= 1271 \text{ g}$$

$$P_4+T= 3110 \text{ g} \qquad P_4= 1300 \text{ g}$$

$$\text{Poids moyen : } M= (P_1+ P_2+ P_3+ P_4) /4 = 1276 \text{ g}$$

$$\text{Masse volumique réelle : } P/V=0.64 \text{ g/cm}^3$$

II.4.1.2. Masses volumiques absolue (Méthode de pycnomètre graduée) (NF EN 1097-6) :

- ✓ Remplir l'éprouvette graduée d'un volume V_1 d'eau,
- ✓ Peser une masse de la chaux M et l'introduire dans l'éprouvette en éliminant les bulles d'air en frappant légèrement l'éprouvette contre la paume de la main.

- ✓ Lire sur l'éprouvette le nouveau volume obtenu V2 les lectures de volume doit être effectuées en bas de ménisque d'eau.



Photo. II.3. L'essai de masse volumique réelle (LTPS)

Les résultats de l'essai la masse volumique absolue de la chaux est suivant :

$$P_1 = 154,1 \text{ g}$$

$$P_2 = 2184,6 \text{ g}$$

$$P_3 = P_1 + P_2 = 2338,7 \text{ g}$$

$$P_4 = 2270,2 \text{ g}$$

$$V = P_3 - P_4 = 69 \text{ cm}^3$$

$$MV = \frac{P_1}{V} = 2,25 \text{ g/cm}^3$$

II.4.1.3. Délais de prises des mortiers de chaux (NF P 15-431) :

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, Le temps de prise initial est défini comme le temps écoulé depuis le contact de l'eau avec la chaux jusqu'au moment où le piston du mélange est à 4 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.



Photo. II.4. Détermination des délais de prise avec l'Appareil de Vicat (LTPS)

II.4.2. Le sable :

Dans notre étude nous avons utilisé Le sable présenté à la photo. II.5, est un sable roulé qui provient d'oued de la Wilaya de Ghardaïa (ZELFANA), Il s'agit d'un sable siliceux caractérisé par un module de finesse de 2.20.



Photo. II.5. Sable d'Oued ZELFANA (LTPS)

Les caractéristiques physiques et la composition chimique du sable utilisé sont représentées dans le tableau III.3 :

Tableau. II.3. Caractéristiques de sable (LTPS)

Paramètres		Valeur spécifique
INSOLUBLES NFP 15-61	Creuset + précipité	16 ,141
	Creuset vide	15,191
	Poids du résidu	0,950
	% Insolubles	95
CULFATES BS 1377	Creuset + précipité	/
	Creuset vide	22,088
	Poids du résidu	/
	% SO_3^{2-}	/
CARBONATES NFP 15-461	V NaOH	/
	% CaCO_3	00

II.4.2.1. Analyse Granulométrique (NF P 18-560) :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme NF P 18-560. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 63 micromètres (0.0063mm).

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

- **Matériels de l'essai :**



Photo. II.6. Les tamis (LTPS)



Photo. II.7. Echantillant et balance (LTPS)

- **Mode Opérateur :**

Après savoir la masse totale du matériau soit (M_T) on fait les étapes de l'essai de la manière suivante :

- **Tamisage :**

- Verser le matériau lavé et séché (M_T) dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de maille décroissante.

- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agit chaque tamis on donnant à la main des coups réguliers sur la monture, d'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus ne se modifie pas de plus de 1% en 1 minute de tamisage.

- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.

- **Pesée :**

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille, soit M_1 la masse de ce refus.

- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur ; ajouter le refus obtenu à M_1 et peser l'ensemble, soit M_2 la masse des deux refus cumulés.

- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés M_3, M_4, \dots, M_{10} .

- Peser s'il y en a le tamisât au dernier tamis.



Photo. II.8. Mélanger manuellement du tamis (LTPS)

Analyse granulométrique du sable utilisé pour cette étude est présentée sur le tableau (Tab. II.4) et La courbe granulométrique sur la figure (Fig. II.1) :

Tableau. II.4. Analyse granulométrique de sable

Tamis	Sable 0/4
8	100
6.3	100
5	100
4	100
2	97
1	93
0,500	70
0,250	37
0,125	17
0,063	1,6

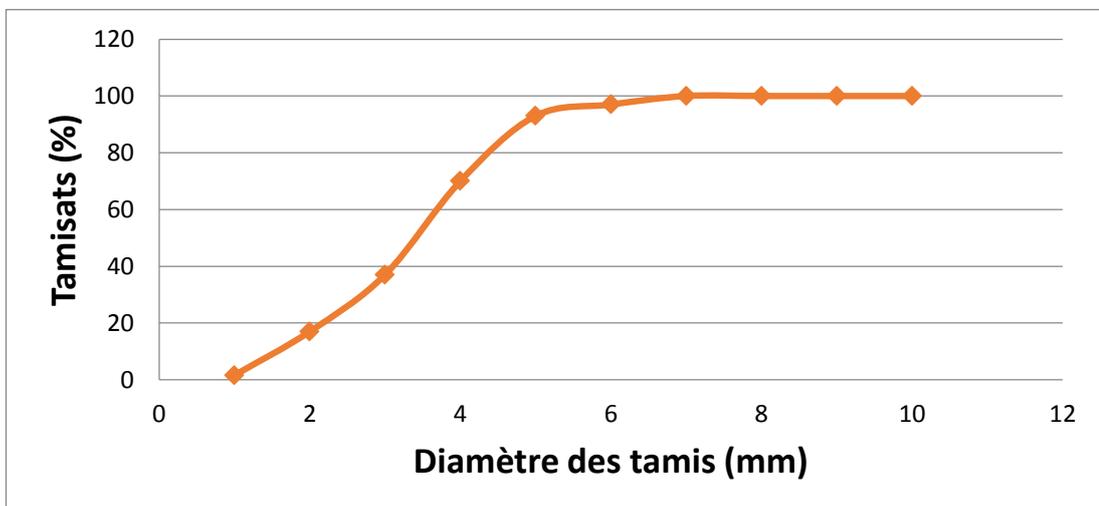


Fig. II.1. Courbes granulométriques du sable**II.4.2.2. Masse volumique (NF EN 1097-6) :**

La masse volumique d'un matériau et la masse de l'unité de volume de ce matériau. On distingue :

- La masse volumique absolue : c'est la masse de l'unité de volume de la matière qui constitue le matériau, sans tenir compte du volume des vides.
- La masse volumique apparente : c'est la masse de l'unité de volume de la matière qui est constitué par la matière et des vides qu'elle contient.

- **But de L'essai :**

Déterminer les masses volumiques absolues et apparente d'un matériau granulaire ne réagissant pas avec l'eau et d'une roche.

- **Principe de L'essai :**

L'essai consiste à déterminer les masses des échantillons, leurs volumes absolu et apparent, et d'en déduire les masses volumiques correspondantes.

- **Matériels de l'essai :**

- ✓ Un récipient
- ✓ Un entonnoir
- ✓ Une balance
- ✓ Une règle métallique
- ✓ Étuve
- ✓ Eprouvette graduée

- **Mode opératoire :**

- **Masses volumiques apparente :**

- ✓ Verser dans le récipient les granulats secs, par couches successives et sans tassement (utiliser l'entonnoir ou les mains).
- ✓ Araser à l'aide de la règle métallique.
- ✓ Peser le récipient rempli : noter (M).
- ✓ Calculer la masse volumique apparente: $\rho_a = M/V$



Photo. II.9. Matériels de l'essai Masse volumique (LTPS)

➤ **Masses volumiques absolue (Méthode de l'éprouvette graduée) :**

- ✓ Remplir l'éprouvette graduée d'un volume V_1 d'eau,
- ✓ Peser une masse de granulat M et l'introduire dans l'éprouvette en éliminant les bulles d'air en frappant légèrement l'éprouvette contre la paume de la main.
- ✓ Lire sur l'éprouvette le nouveau volume obtenu V_2 les lectures de volume doivent être effectuées en bas de ménisque d'eau.

Les résultats de l'essai Masse volumique du sable utilisé pour cette étude est suivant :

• **Masse volumique apparente :**

Volume du récipient $V=2000 \text{ cm}^3$; Poids $P=1810 \text{ g}$

$P_1+T=$	5066 g	$P_1=$	3256 g
$P_2+T=$	5065 g	$P_2=$	3255 g
$P_3+T=$	5063 g	$P_3=$	3253 g
$P_4+T=$	5049 g	$P_4=$	3239 g

Poids moyen : $M= (P_1+ P_2+ P_3+ P_4)/4 = 3251 \text{ g}$

Masse volumique apparente : $P/V=1.63 \text{ g/cm}^3$

- **Masse volumique absolue :**

Poids des agrégats secs $P_1= 356$ g
Poids du récipient plein d'eau $P_2=2184.7$ g
$P_3= P_1+ P_2= 2540.6$ g
Poids récipient + agrégats + eau=
$P_4= 2406,5$ g

Volume des agrégats $V= P_3- P_4= 134$ cm³

Masse volumique absolue $P_1/V =2.65$ g/cm³

II.4.2.3. L'essai d'équivalent de sable (NF EN 933-8) :

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle d' « essai d'équivalent de sable piston » ou, plus simplement, d' « essai d'équivalent de sable ».

- **But de la manipulation**

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons l'est aussi pour les sols, mais son importance est moindre, le paramètre le plus significatif étant la valeur de bleu du sol.

Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossier. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui.

Objet : l'essai consiste à déterminer le pourcentage d'éléments fins au sein d'un matériau sableux.

- **Principe de l'essai**

L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide pour ne pas perdre d'éléments fins. (NP, dans cette manipulation on n'aura pas fait de tamisage préalable pour des raisons de temps et on partira d'un échantillon d'éléments fin), On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 mn, on mesure les éléments suivants :

- la hauteur h1 : sable propre + éléments fins
- la hauteur h2 : sable propre seulement

On en déduit l'équivalent de sable : $ES = (h1/h2) 100 \%$

Il y a 2 façons de mesurer h2, soit visuellement pour déterminer ESV (équivalent de sable à vue), soit avec un piston pour déterminer ES.

Le mode opératoire a une grande influence sur le résultat donc il faut le suivre scrupuleusement.

L'essai est effectué avec 120 g de grains. Il est préférable d'utiliser un échantillon humide, pour éviter les pertes des éléments fins du sol. Il faut tamiser au tamis de 4 mm, éliminer le refus, et recueillir tout le tamisât.

- **Matériels de l'essai :**

- ✓ Chronomètre
- ✓ Balance de précision
- ✓ Deux éprouvettes en matière plastique normalisées avec deux bouchons
- ✓ Piston taré normalisé Tube laveur
- ✓ Machine agitatrice
- ✓ Bonbonne de 5 litres, avec piston et tube souple de 1.50 m environ
- ✓ Règle de mesure
- ✓ Entonnoir



Photo. II.10. Matériels de l'essai d'équivalent de sable (LTPS)

On utilise une solution lavante qui permet de séparer les éléments fins argileux. Elle est composée de chlorure de calcium anhydre, de glycérine et d'une solution aqueuse. On obtient la solution lavant au moment de l'essai en diluant une dose de ce mélange dans de l'eau déminéralisée.

- **Mode opératoire :**

1 - Préparer le matériel d'essai :

- Disposer la bonbonne contenant les 5 litres de solution lavant à 1 m au dessus du fond des éprouvettes ;
- Amorcer le dispositif si phonique et le relier au tube laveur ;
- Préparer deux éprouvettes normalisées propres ;
- Remplir les éprouvettes jusqu'au trait inférieur.

2 - Prélever 120g de sable sec, préalablement séjourné à l'étuve pendant 24 heures. Si on ne dispose pas de sable sec, déterminer la teneur en eau ω et prendre une quantité de sable humide correspondant à 120 g de sable sec, c'est-à-dire $120(1 + \omega)$ g, Verser la quantité de sable dans l'éprouvette.

3 - Éliminer les bulles d'air en frappant légèrement les éprouvettes contre la paume de la main. Laisser reposer 10 minutes.

4 - Boucher les éprouvettes et les faire agiter à l'agitateur mécanique (90 allers et retours en 30 secondes).

5 - Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur :

- Rincer le bouchon au-dessus de l'éprouvette ;
- Faire descendre et remonter lentement le tube laveur qu'on tourne entre les doigts, dans la masse de sable ; ainsi les particules fines remontent en haut ;
- Sortir le tube laveur et fermer le robinet lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.

6 - Laisser reposer 20 minutes \pm 10 seconde, en évitant toute vibration.

7 - Mesurer visuellement (à la règle) h1 et h'2 au millimètre près.

8 - Descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette ; l'immobiliser au contact du sable ; mesurer h2 au millimètre près.

9 - Noter la température au degré près (l'essai variant en fonction de la température, celle-ci devrait être égale à 20° c).

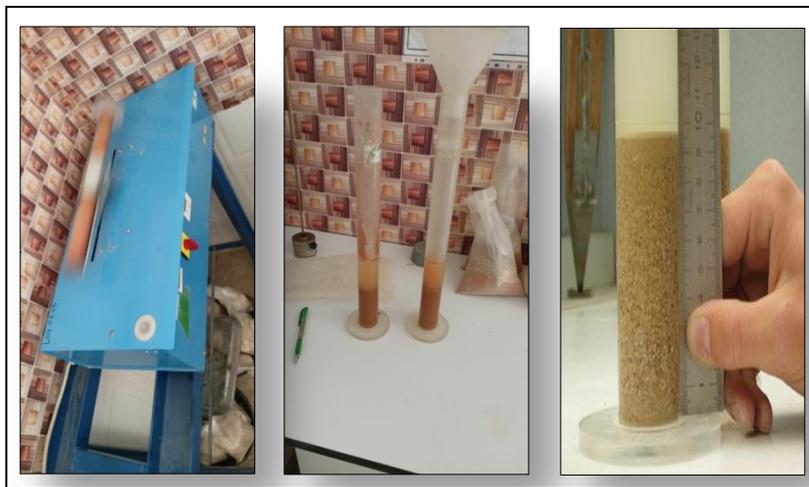


Photo. II.11. l'essai d'équivalent de sable (LTPS)

Les résultats de l'essai d'équivalent du sable utilisé pour cette étude est sur le tableau suivant :

Tableau. II.5. Les résultats de l'essai d'équivalent du sable

Hauteur totale H_1	Hauteur de sable H_2 (Piston)	$ES = (H_2/H_1) \times 100$	ES moyen %
12,4	8	0,645	62.8=63 %
13.4	8,2	0,612	

II.4.3 L'eau :

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais de formulation de mortier de chaux, est une eau courante de robinet, dépourvue des excès de sels, de sulfates et des acides.

On déterminant le volume d'eau absorbé pour une masse donnée de chaux vive (Tableau III.6) :

Tableau. II.6 : Les types de chaux par le volume d'eau absorbé [17]

Type de chaux	H_2O / CaO
Chaux grasse	2,6 à 3,6
Chaux moyenne	2,3 à 2,6
Chaux maigre	1 à 2,3

II.4.4 Le poudre de fer (solide) :

La poudre de fer est un déchet industriel extrait de l'industrie des pipes .la poudre utilisée dans notre étude est ramenée de l'unité de fabrication des pipes située dans les zones industrielle de BOUNOURA dans la wilaya de GHARDIA.



Photo. II.12. Le poudre de fer de ALFAPIPE

La composition chimique ainsi que les propriétés physiques de la poudre de fer de cette

étude sont présentées dans les tableaux (Tableau. II.7 et Tableau. II.8):

Tableau. II.7. Caractéristiques chimiques de la poudre de fer (ALFAPIPE)

Paramètres	Valeur (%)
C	0,80 à 1,20
Si	0,40 à 1,20
Mn	0,60 à 1
S	0 à 0,05
P	0 à 0,05

Tableau. II.8. Caractéristiques Physique de la poudre de fer (ALFAPIPE)

Paramètres	Spécification
Dureté ²	597 Hv
Densité	7,69 g/cm ³
Coefficient de forme	0
Microstructure	Fine et homogène

I.5. La chaux et la poudre de fer :

➤ Grenailage :

C'est une cabine que contient un turbin de projection pour d'un jet l'abrasif à haute Pression contre la surface extérieure de tube.

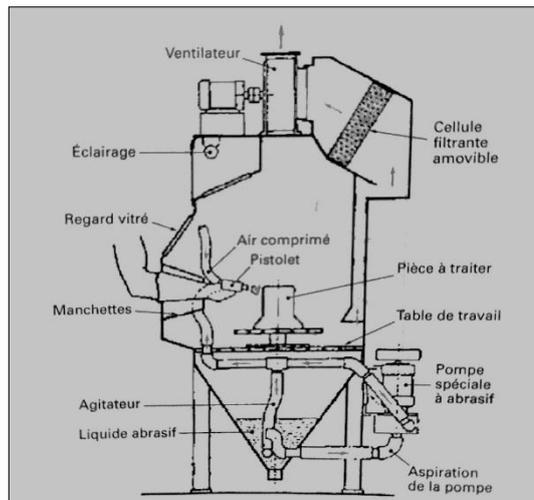
Le grenailage des tubes est une technique consistant à projeter, à l'aide d'une grenailleuse, des graines métallique (haute dureté) sur la surface de tube pour en modifier la structure superficielle. Le décapage fait par projection de particules abrasives n'ayant pas la forme d'une bille (il faudrait alors en principe plutôt parler de sablage) afin de :

- Enlever les contaminants de surface.
- Rendre rugueuse une surface lisse.
- Nettoyer les surface.
-

Le profil de surface obtenu doit être d'une rugosité et degré de soins comprise selon ISO 21809 :2011



Photo. II.13. Grenailleuse (machine de projection abrasive) (ALFAPIPE)



**Photo. II.14. Projection par air comprime de la grenailleuse
(Dossier technique Décapage mécanique par grenailage)**

Cette photo présenter l'état final du tube en acier après sortir du grenailage.



Photo. II.15. l'état final de du tube en acier après sortir du grenailage (ALFAPIPE)

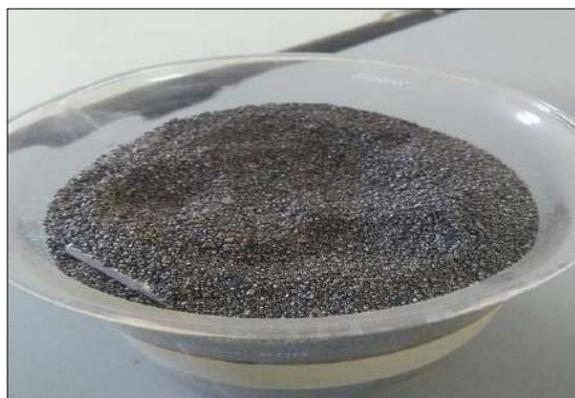
➤ **Grenailles, abrasifs :**

Les abrasifs d'acier :

Sont des particules d'acier de la différente dureté qui sont utilisée comme abrasifs ou comme agents de grenailage. Ils sont généralement disponibles en deux formes différentes (angulaire et sphérique) qui s'adressent à différentes applications industrielles.

La projection des graines métallique (haute dureté) sur la surface de tube pour en modifier la structure superficielle pour nettoyage et augmenter la rugosité de surface.

**Photo. II.16.
(grenaille)**



**Abrasive d'acier
(ALFAPIPE)**

➤ **Dépoussiérage Des
Grenailage :**

Installations De

Les
installation de grenailage, ont trois origines :

poussières, en

- Les contaminants des pièces traitées.
- Les particules de grenailles ou d'à brands éliminées en fragments éclatés de petite dimension, en écailles ou simplement parce que de dimensions trop faibles pour être utilisables ms particules provenant des pièces de la machine de grenadage du fait de l'usure ou d'un arrachement.
- Va donc falloir dépoussiérer les installations, c'est à-dire capté transporter, séparer et évacuer les poussières émises.

Le support choisit for la captation est qualitative et quantité tige la vitesse de circulation de l'air et à dire son pour porteur conditionne également une bonne captation.

Four le choix du type de dépoussiéreur à adopter dans une installation, il y a lieu de tenir compte de la granulométrie des poussières à capter. La concentration des poussières par métré cube d'air : On peut citer (of article séparation des poussières et des vésicaux les liquides dans le traité Généralités) Les dépoussiéreurs mécaniques (chambre de détente, cyclone).

Les dépoussiéreurs à alimente filtrants poreux qui sont acteurs lament les procédés les plus courants dans le grenaillage et les plus efficaces.



II.6. Formulation du mortier de la cnaux :

II.6.1. Préparation du matériels et matériaux :

Il faut que l'équipement et les matériaux nécessaires doivent être préparés pour effectuer ce mélange de mortier.



Photo. II.18. Les matériels utilisés (LTPS)**Photo. II.19. Les matériaux utilisés (LTPS)**

II.6.2. Préparation de mélange de chaux :

Tout d'abord nous procédons à la préparation du pate de chaux en mélangeant la chaux avec l'eau :

La quantité de la chaux est : $M_{\text{chaux}} = 3600 \text{ g}$

Le volume de l'eau est : $V_{\text{l'eau}} = 6 \text{ l}$

Après ça on mélange bien la pâte et on laisse la chaux fermenter pendant deux jours.

**Photo. II.20. Le mélange de la chaux (LTPS)**

II.6.3. Préparation des éprouvettes :

Nous divisons le mélange par dosage et mélange avec une quantité de sable constante pour chaque dosage que :

$$M_{\text{mortier (chaux + l'eau)}} = 1200 \text{ g} ; M_{\text{Sable}}=1350 \text{ g}$$

L'incorporation de la poudre de fer c'est fait par ajout des taux de 2, 5, 8, et 15% par rapport de la masse de chaux . Le tableau (Tab. II.9) résume les différentes compositions des mortiers étudiés.

Tableau II.9. Les différentes compositions des mortiers étudiés.

Mortiers	Constituants	Masse (g)
Mortier témoin (MT)	Sable	1350
	L'eau	750
	Chaux	450
	Poudre de fer	/
2 % Poudre de fer	Sable	1350
	L'eau	750
	Chaux	450
	Poudre de fer	9
5 % Poudre de fer	Sable	1350
	L'eau	750
	Chaux	450
	Poudre de fer	22,5
8 % Poudre de fer	Sable	1350
	L'eau	750
	Chaux	450
	Poudre de fer	36
15 % Poudre de fer	Sable	1350
	L'eau	750
	Chaux	450
	Poudre de fer	67,5

Le malaxage des mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur et manuellement par les mains.



Photo. II.21. Le malaxage des mortiers (LTPS)

Après ça on coule les moules par les mortiers de la chaux et on fixe les moules dans appareille de compactage, on laisse 180 secondes pour compacté bien.



Photo. II.22. Coulage et Compactage des moules

II.6.4. Conservation des éprouvettes (NBN EN 1015-2) :

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) ;

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 48 heures à l'air libre. Une fois le démoulage effectué,

les éprouvettes sont référenciées et conservées à l'air libre 7 jours et après ça on conservées à une température ambiante au laboratoire jusqu'aux échéances des différents essais qui sont de 14, 28 et 56 jours pour les essais mécaniques.



Photo. II.23. Démoulage (LTPS)



Photo. II.24. Conservation à l'aire libre (LTPS)



Photo. II.25. Conservation à une température ambiante au laboratoire (LTPS)

II.7. Essais sur mortier durci

- **Essai de traction par flexion (NF EN 196-1) :**

Les essais de traction par flexion trois points sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm selon la norme NF EN 196-1 (NF EN 196-1, 2006), Il s'agit d'une machine d'essai électromécanique d'une capacité de 10 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 donnée (**Photo. II.27**). 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.



Photo. II.26. Essai de traction par flexion (LTPS)

- **Essai de compression (NF EN 196-1) :**

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 réalisé sur une la même machine que celle de la flexion avec la même vitesse de traverse (**Photo. II.28**). Les mortiers d'étude ont été testés de la compression représentent la moyenne de six éprouvettes.



Photo. II.27. Essai de Compression (LTPS)

II.8. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des différents matériaux utilisés pour la formulation de mortiers à base de chaux avec ajout de la poudre de fer.

Afin d'analyser l'effet de l'ajout de notre aditif (poudre de fer) dans le mortier de chaux, nous avons réalisé des essais physique et mécanique, expliqué en détail ainsi que leur mode d'exécution.

Tous les résultats de cette étude sont présentés et analysés dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats et discussion sur mortiers de la chaux

III.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence de l'ajout de la poudre de fer sur les propriétés des mortiers à base de chaux aérienne. On a ajouté La poudre de fer à cinq taux différents soit 0, 2, 5, 8 et 15 % du poids 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.

Les résultats obtenus sont les suivants :

III.2. Effet de la poudre de fer sur les délais de prise

L'estimation de l'apport de la poudre de fer en fonction des proportions d'ajout sur le temps de prise ont été effectuée à l'aide de l'essai Vicat, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure (Fig. III.1).

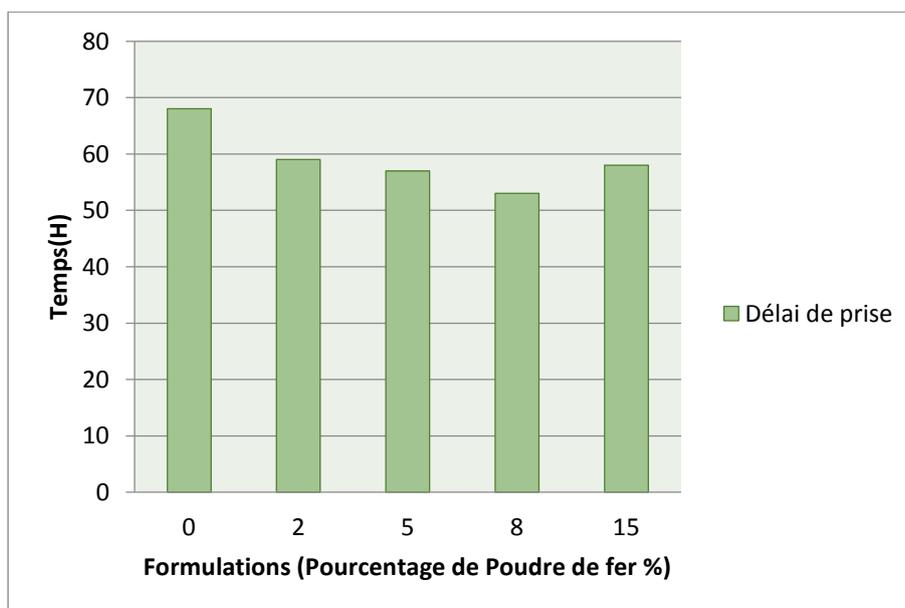


Fig. III.1. Effet de la poudre de fer sur les délais de prise

D'après la figure (Fig. III.1) on constate que le temps de prise d'un mortier de chaux témoin (sans ajout de poudre de fer) est de 68 heures, on assiste à une diminution des temps de début de prise avec l'augmentation du taux d'ajout de la poudre de fer. À titre d'exemple, l'ajout de 2 % de poudre de fer réduit le temps de début de prise à 59 heures, tandis que l'ajout à de 8 % de poudre de fer diminue le début de prise jusqu'à 52 heures, on remarque que l'ajout de 8 % de poudre de fer a permis d'avoir le temps de début de prise le plus court et que ce dernier commence à s'élever en augmentant le taux de poudre de fer (58 heures pour un taux de 15%)

Donc nous pouvons conclure que l'ajout de poudre de fer au mortier de chaux contribue à la diminution de temps de début de prise si le taux d'ajout n'est pas très important (inférieur à 15%)

III.3 Résultats obtenus sur mortiers à l'état durcis :

III.3.1 Résistance mécanique à la traction par flexion :

Le tableau (Tab. III.1) suivant présente des résultats en flexions 3 points du mortier témoin (MT) et des mortiers à base de poudre de fer à des échéances de 14, 28 et 56 jours.

Tableau III.1. Résistance mécanique à la traction par flexion

Age	Type des mortiers	RT (bar)
14 jours	Témoin (0% de fer)	1.01
	2% de fer	1.13
	5% de fer	1.21
	8% de fer	2.11
	15% de fer	2.34
28 jours	Témoin (0% de fer)	2.1
	2% de fer	3.05
	5% de fer	3.36
	8% de fer	3.67
	15% de fer	4.38
56 Jours	Témoin (0% de fer)	2.6
	2% de fer	3.59
	5% de fer	3.98
	8% de fer	4.49
	15% de fer	5.39

Les figures suivantes représente la résistance de tractions par flexion de chaque âge:

- **Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 14 jours:**

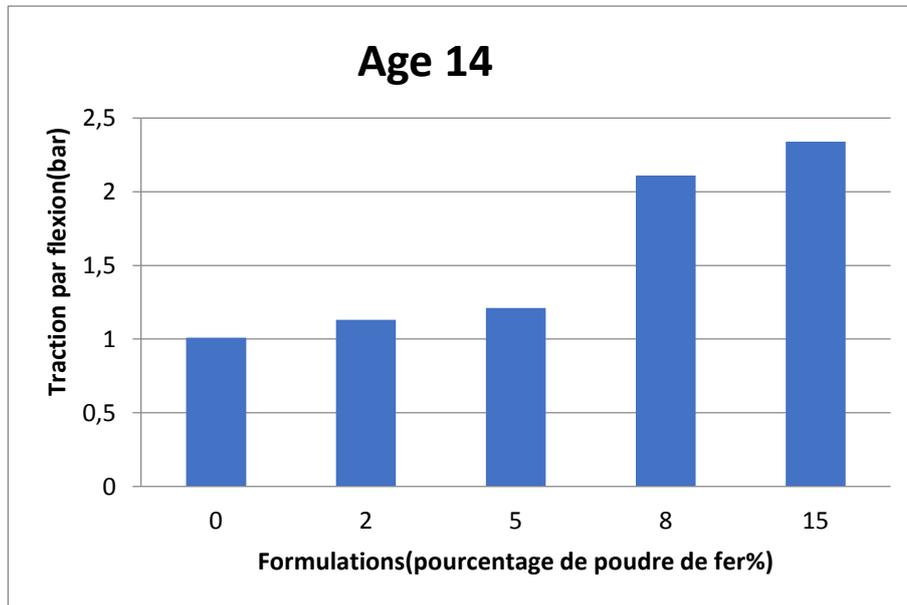


Fig. III.2. Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 14 jours

On remarque que il ya une amélioration des résistances à la traction par flexion, que la valeur de résistance à la traction par flexion à pourcentage 15% est presque deux fois la valeur obtenu pour le mortier témoin.

- **Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 28 jours:**

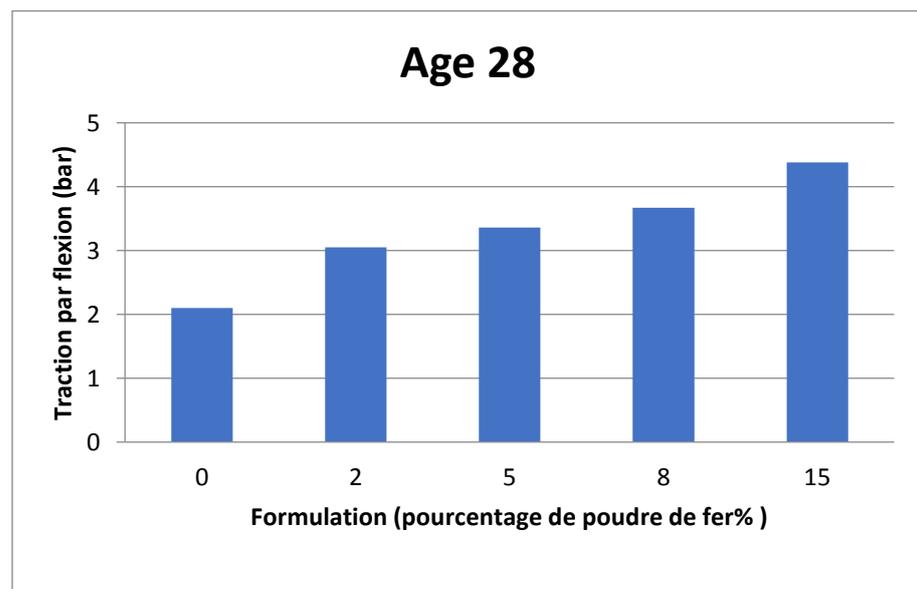


Fig. III.3. Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 28 jours

On remarque que il ya une bon amélioration des résistances à la traction par flexion par apport à l'âge 14 jours, et on remarque que le même chose que la valeur de résistance à la traction par flexion à pourcentage 15% est presque double deux fois de la valeur à mortier témoin.

- **Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 56 jours:**

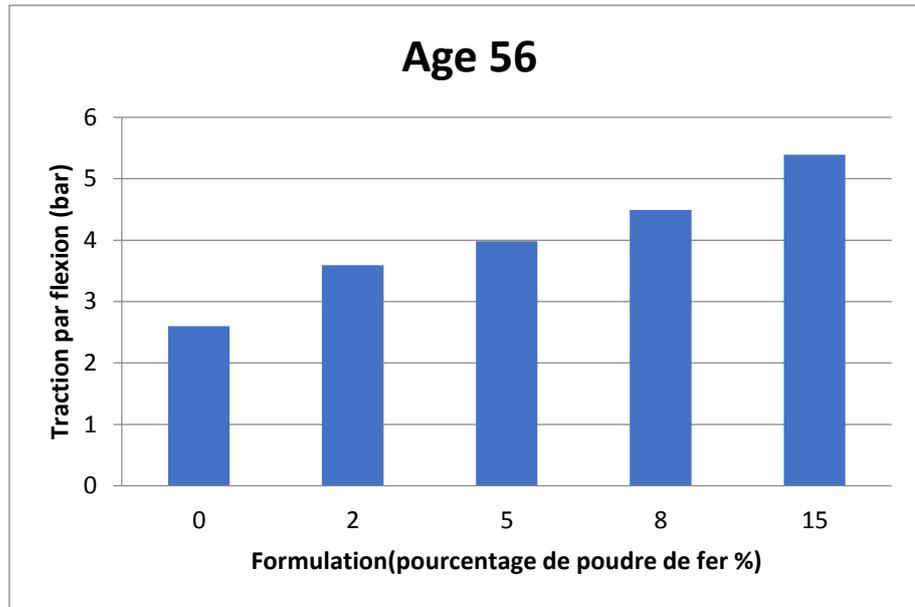


Fig. III.4. Résistance mécanique à la traction par flexion à l'âge 56 jours

On remarque que il ya une excellent amélioration des résistances à la traction par flexion par apport les âges précédent, On remarque que La meilleure résistance est obtenue avec un taux de 15 % de poudre de fer.

Le figure (Fig. III.5) suivant présente des résultats en flexions 3 points du mortier témoin (MT) et des mortiers à base de poudre de fer à des échéances de 14, 28 et 56 jours.

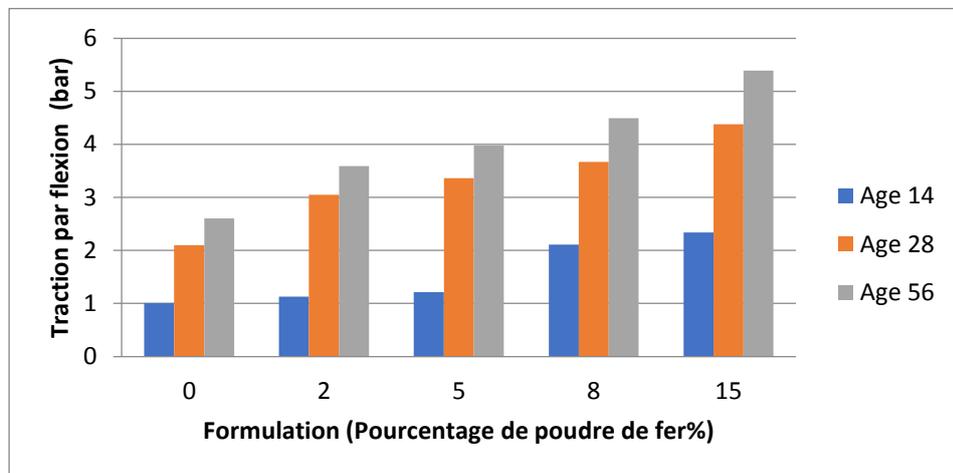


Fig. III.5. Résistance mécanique des mortiers à la traction par flexion

D'après le tableau (Tab III.1) et la figure (Fig. III.2) on remarque clairement l'effet bénéfique de la poudre de fer par ajout à la chaux par rapport à mortier témoin. L'ensemble des mortiers à base de poudre développent des résistances à la flexion supérieure au mortier témoin, Cette amélioration des résistances est proportionnelle au taux de ajoutassions de poudre de fer, Un taux d'ajout de 15 % en poudre de fer permet d'avoir le maximum de résistance, L'amélioration des résistances à la flexion des mortiers à base de poudre de fer est plus ou moins importante, on assiste à une amélioration par rapport au mortier témoin. Là aussi l'amélioration de la résistance à la traction par flexion est proportionnelle à l'augmentation du taux de ajoutassions à la chaux, La meilleure résistance est obtenue avec un taux de 15 % en poudre de fer.

Remarque :

On remarque que la valeur de résistance à la traction par flexion à pourcentage 15% est presque le double de la valeur à mortier témoin pour tous les âges.

III.3.2 Résistance mécanique à la compression :

Après les essais de traction par flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. Le tableau (Tab III.2), représente les résultats de la compression, chaque valeur est la moyenne de six valeurs de compression.

Tableau. III.2. Résistance mécanique à la compression

Age	Type des mortiers	RC (bar)
14 jours	Témoin (0% de fer)	4.06
	2% de fer	4.61
	5% de fer	4.98
	8% de fer	5.52
	15% de fer	6.51
28 jours	Témoin (0% de fer)	4.48
	2% de fer	6.25
	5% de fer	6.77
	8% de fer	7.08
	15% de fer	9.06
56 Jours	Témoin (0% de fer)	6.51
	2% de fer	8.54
	5% de fer	9.11
	8% de fer	9.38
	15% de fer	10.3

Les figures suivantes représentent la résistance de compression de chaque âge:

- **Résistance mécanique à compression à l'âge 14 jours**

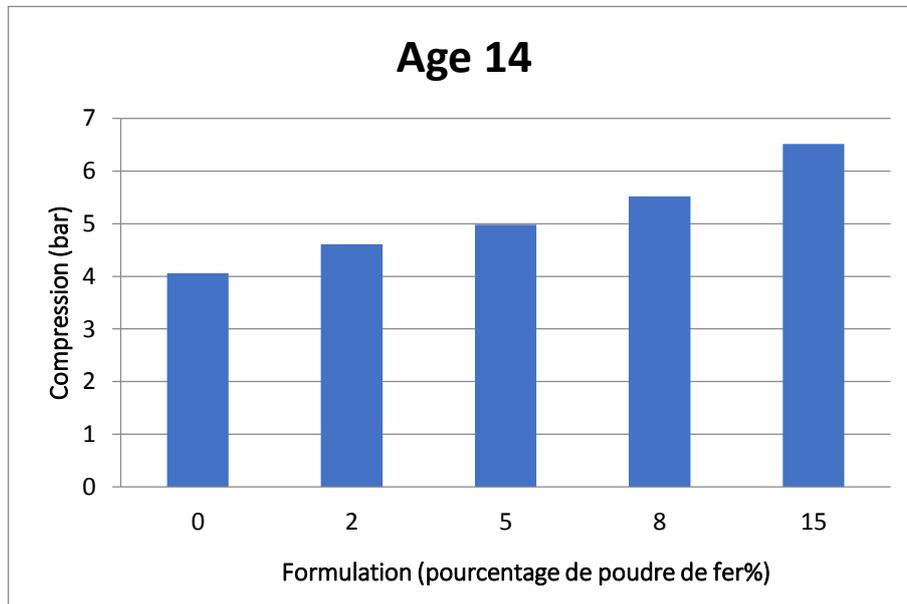


Fig. III.6. Résistance mécanique à compression à l'âge 14 jours

On remarque que Les mortiers à base de poudre de fer développent bien les résistances par rapport à des mortiers témoins, différence entre résistances de mortier témoin et mortier à base de poudre de fer par taux 15 % est 2 bars.

- **Résistance mécanique à compression à l'âge 28 jours**

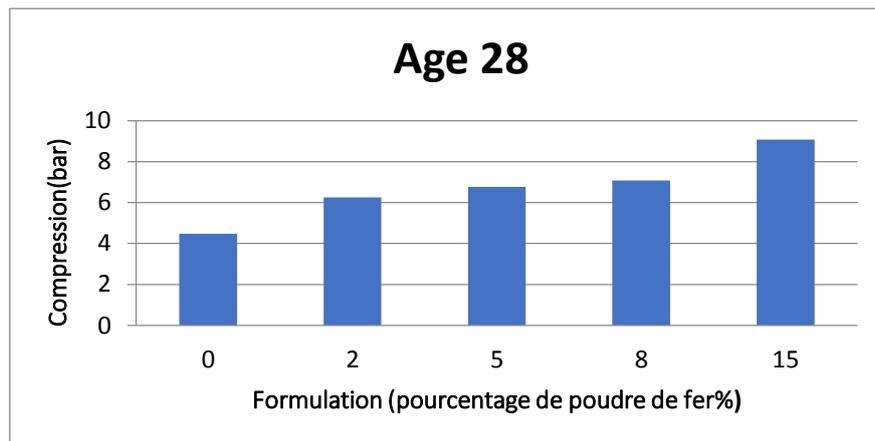


Fig. III.7. Résistance mécanique à compression à l'âge 28 jours

On remarque La même chose pour cet âge que la valeur de résistance à compression pourcentage 15% est double de la valeur à mortier témoin.

- **Résistance mécanique à compression à l'âge 56 jours**

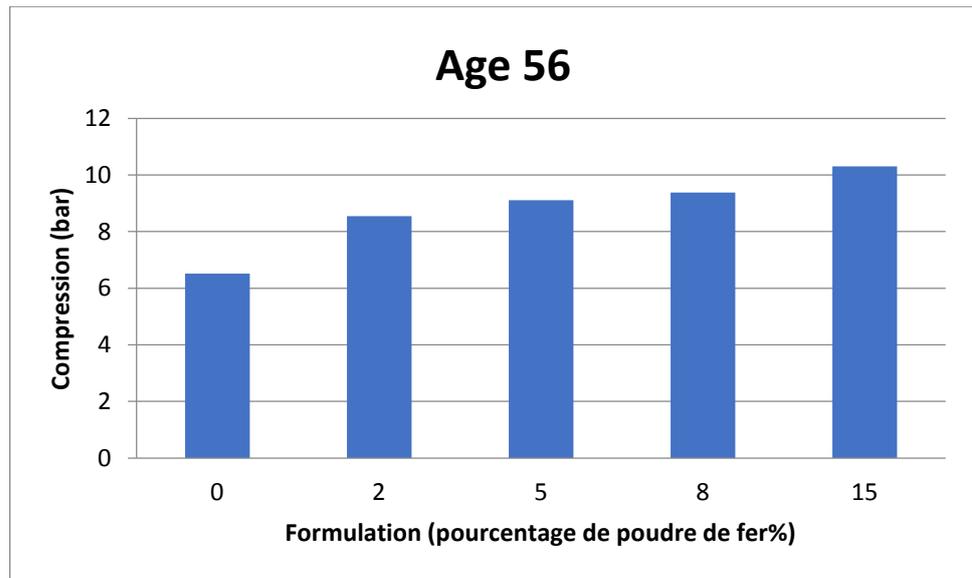


Fig. III.8. Résistance mécanique à compression à l'âge 56 jours

On remarque que l'ajout de poudre de fer a provoqué une légère augmentation de la résistances à la compression et que la valeur maximale obtenue à 56 jours d'âge est de 10.3 bars.

La figure suivante représente les résultats de la compression, chaque valeur est la moyenne de six valeurs de compression du mortier témoin (MT) et des mortiers à base de poudre de fer à des échéances de 14, 28 et 56 jours.

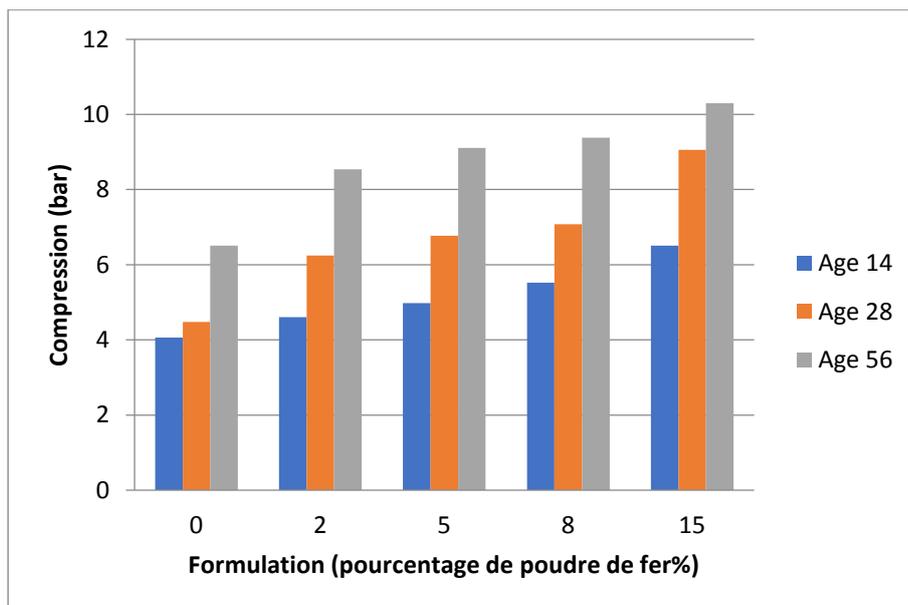


Fig. III.9. Résistance à la compression des mortiers

On peut conclure que l'ajout de poudre de fer a permis de développer une légère augmentation de la résistance à la compression qui est à l'origine faible.

III.4 Densité des mortiers :

La densité ou densité relative d'un mortier est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un mortier témoin pris comme référence. Le corps de référence est l'eau pure à 4 °C pour les liquides et les solides. . La densité est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure, Le tableau (Tab. III.3) suivant présente des résultats :

Tableau.III.3 La densité des mortiers

Age	Type des mortiers	P _{moyen} (g)	Densité
14 jours	Témoin (0% de fer)	401,06	1,57
	2% de fer	409,93	1,6
	5% de fer	418,19	1,63
	8% de fer	377,2	1,47
	15% de fer	409,94	1,61
28 jours	Témoin (0% de fer)	392,14	1,53
	2% de fer	395,97	1,55
	5% de fer	405,82	1,59
	8% de fer	389,61	1,52
	15% de fer	396,81	1,57
56 Jours	Témoin (0% de fer)	391,99	1,53
	2% de fer	391,83	1,53
	5% de fer	399,13	1,56
	8% de fer	387	1,5
	15% de fer	385,34	1,51

D'après le tableau (Tab. III.3) on conclure que la densité est presque constante pour tous les types des mortiers à chaque âge, à l'âge 14 jours la valeur maximal est 1,63, et à l'âge 28 jours la valeur maximal est 1,59, et à l'âge 56 jours la valeur maximal est 1,56, enfin les valeurs maximales égal $(1,55 \leq d \leq 1,64)$.

III.4 Conclusion

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

- La poudre de fer a 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 l'addition.
- Le poudre de fer a donné les bons résultats concernant la résistance à la traction par flexion et à la compression et cela pour un taux de 15%, 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 15% de l'ajout.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les techniques et les matériaux de restauration des bâtiments anciens ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années et les avantages du mortier de chaux dans ce domaine ont été clairement démontrés. Notre objectif dans ce travail était d'étudier l'effet de l'addition sur différentes propriétés du mortier de chaux.

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.

On a essayé par ce travail de voir l'influence de la poudre de fer sur les caractéristiques des mortiers à base chaux, Cette poudre n'est jamais utilisée, nous l'avons donc testée sur du mortier de chaux pour améliorer les propriétés car nous savons que le fer et ses types améliorent les propriétés du béton.

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

- Concernant le temps de prise, la poudre de fer est sensiblement accélérée le temps de prise,
- S'agissant des résistances mécaniques à la traction, et à la compression, la poudre de fer est augmentée les résistances, cependant c'est le mortier de taux 15% d'ajout de poudre de fer qui est donné les meilleures résistances qui augmentaient proportionnellement avec l'augmentation du taux de ajoutassions, incitant ainsi l'éventualité d'essayer des pourcentages au-delà de 15%.

En générale, En comparant les résultats du pourcentage ajouté de poudre de fer, nous pouvons conclure que plus la quantité de poudre de fer est élevée, plus elle est bénéfique pour l'apport de chaux, on propose que :

- Caractériser les mortiers à long terme.
- Augmenter les ajoutassions au-delà de 15% pour le poudre de fer.

**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

1. **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.
2. **ANISSA (2004).** Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physique, mécanique et de durabilité des mortiers.
3. **AYAT, (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.
4. **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.
5. **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.
6. **COUTELAS, (2005)** « Le mortier de chaux ». Éditions errance, Paris.
7. **CLAUDE, (1994).** La chaux, ses utilisations. Balthazar et Cotte (Groupe Lhoist)-Tech. Nathan- France.
8. **HERRIER, G., PELLETIER, M. et PUIATTI, D., 2010.** Chaux aérienne. Contexte, fabrication, domaines applicatifs. Collection Techniques de l'ingénieur, C-923, France.
9. **LHOIST-SA-1992, (2006).** Brochures et Prospectus : Les utilisations de la chaux –La chaux, fabrication, usages- La chaux dans l'épuration des eaux – La chaux dans le traitement des gaz de fumées – La chaux dans la stabilisation et la valorisation des boues... Groupe Lhoist, coordination Center B-1342. Limelette, Belgique.
10. **MCKEE, (1973).** Introduction to early American masonry – stone, Brick, Mortar and plaster. Washington, D.C.: National Trust for Historic Preservation and Columbia University.
11. **NBN EN 1015-2. (2007).** Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 2 : échantillonnage global des mortiers et préparation des mortiers d'essai.
12. **NBN EN 1015-6. (2007).** Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais.
13. **NF EN 196-1. (2006).** Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances mécaniques.

Références bibliographiques

14. **NF P 15-431. (1994).** Liants hydraulique-Technique des essais, détermination du temps de prise sur mortier normal.
15. **NF P 18-560. (1990).** Granulats Préparation d'un échantillon pour essai.
16. **NF EN 1097-6 (2001).**détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
17. **NF EN 933-8 (1990).** évaluation des fines - équivalent de sable
18. **OUKIL Seif Eddine, (2019),** Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les propriétés des mortiers de chaux aériennes.
19. **ECOLE D'AVIGNON GROUPE, (2003).** Techniques et pratique de la chaux.
20. **NOUR EDDINE BOUAROUA, (2015).** La chaux, matériaux de construction et de restauration, office de protection et de promotion de la vallée du M'Zab.

Les annexes

Annexe 01:

► **Caracteristiques chimiques**

Paramètres	Valeur (%)
CaO	67,4 à 73,25
MgO	<0,4
FE ₂ O ₃	<2
AL ₂ O ₃	<1
SiO ₂	<2,2
So ₃	<1
Na ₂ O+ K ₂ O	<0,4
Co ₂	<5
CaCO ₃	<10
Ca (OH) 2	>80
Insoluble dans HCL	<0,35

► **Caracteristiques physiques**

Paramètres	Valeur spécifique
Densité	< 500 g/l
Constance volumique	Bonne
Poids spécifique	2,26 g/ cm ³
H ₂ O d'hydratation	19,46 à 23,29
Refus 630 μ	0 %
Refus 90 μ	10,00 %

Annexe 02:

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE

Structure : Unité Ghardaïa
 N° Dossier interne : **Bourjil + Sebti** Lieu de travail : Service chimie
 Équipements utilisés : Balance - Four-
 Date : **22/02/2023**

Échantillon :
 Opérateur :
 N° D'inventaire : L.21.05-15-L49,08.09-L53.02.86

ÉCHANTILLON	Creuset+précipité	Sable				V _m =	Creuset vide	Sable				V _m =	Creuset+précipité	Creuset vide	Sable				V _m =	
		1	2	3	4			1	2	3	4				1	2	3	4		
INSOLUBLES NPP 15-6:	Creuset+précipité	16,141					Creuset vide	15,191					Creuset+précipité	Creuset vide	0,950					
	Poids du résidu						% Insolubles	95												
	Creuset+précipité						Creuset vide	22,088												
	Poids du résidu						% SO ₃ ²⁻	—												
SILICATES 1377	V NaOH						% CaCO ₃	00												
	PH _i (initial)						PH _i (tirage)													
CARBOINATES NFP 15-461	V _{AgNO3}	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2		Test 1	Test 2	Test 1	Test 2		Test 1	Test 2	Test 1	Test 2		Test 1	Test 2		
	V _m (moyen)						V _m (moyen)													
CHLORURES Méthode de Mohr	% Cl ⁻						% NaCl													
	% Matière organique	V1	V2	V3	V4	V _m =	V1	V2	V3	V4	V _m =	V1	V2	V3	V4	V _m =	V1	V2	V3	V4
MATIERE ORGANIQUE NFP 94-055																				
AUTRES ESSAIS																				
L'Opérateur											Visa du responsable									

F-5-Sc.a.03

Annexe 03:

CERTIFICAT DE CONFORMITE



W Abrasives

CERTIFICATE OF ANALYSIS
 Certificat d'analyse - Analysen zertifikat - Certificato di analisi
 NF-EN 10204 (Mod. 3.1)

CUSTOMER (Client / Kunde / Cliente) SPA ALFAPIPE ROUTE DE BARAKI GUE DE CONSTANTINE KOUBA W.D ALGER 16050 ALGERIE		Packing List (Avis exp. / Lieferschein, Aviso spedizione) n° 49331
BATCH N° (N° de lot / Parte n°) 121298	PRODUCT (Produit / Produkt / Prodotto) W GL025	
Order (Cmde/Auftrag/Comando) n° 19925	NET WEIGHT (Poids net / Netto Gewicht) 10.500 Kg	DATE (Date / Datum / Data) 08 12 2021

SIZE ANALYSIS
 (Analyse granulométrique / Korngröße / Analisi granulometrica)

N° / SCREEN SIZE	SPECIFICATION %	% REFUSED
N° / Dimension du tamis	Spesifikation %	% de rifiuto
N° / Maschinwaile	Spesifikation %	% di rifiuto
N° / Dimensione setaccio	Spesifikation %	% di rifiuto
14 1,40	0	0
16 1,18		40
18 1,00		12
20 0,85		48
25 0,71	85	78
30 0,60	97	94
35 0,50		98
40 0,42		

HARDNESS (Dureté / Härte / Durezza)

Specification (Spesifikation / Spezifikation / Specificazione)
 570 Hv < H < 650 Hv

Results (Résultats / Results)
 597 Hv

DENSITY (Densité / Dichte / Densità)

Specification (Spesifikation / Spezifikation / Specificazione)
 D >= 7,60 g/cm3

Results (Résultats / Results)
 7,69 g/cm3

SHAPE (Coefficient de forme / Formkoeffizient / Coefficiente di forma)

Specification % (Spesifikation / Spezifikation / Specificazione)
 S >= N/A NOT APPLIED

Results % (Résultats / Results)
 0

CHEMICAL COMPOSITION
 (Compo. chimique / Chemische Zusammensetzung / Compo. chimica)

Specifications %

0,80 < C < 1,20
0,40 < Si < 1,20
0,60 < Mn < 1,00
0,00 < S < 0,05
0,00 < P < 0,05

MICROSTRUCTURE (Microstructure / Mikrostruktur / Microstruttura)

Specification (Spesifikation / Spezifikation / Specificazione)

Results (Résultats / Results)
 MARTENSITE
 FINE ET HOMOGENE

This product is in accordance with the data sheet specifications. These results stem from the application of our control plan.
 Ce produit est conforme aux spécifications de notre fiche technique. Ces résultats sont issus de l'application de notre plan de contrôle.
 Dieses Produkt entspricht den Spezifikationen. Diese Daten wurden gemäss unseren Prüfanweisungen ermittelt.
 Questo prodotto è conforme alle specifiche della scheda tecnica. Questi risultati sono ottenuti con l'applicazione del nostro piano di controllo.

LABORATORY MANAGER
 Le chef du laboratoire
 Laboratorio
 Il capo del laboratorio

COMMERCIAL MANAGER
 Le responsable commerciale
 Il responsabile commerciale
W Abrasives
 Winoa - BP 3038570 Le Cheylas - Fran.
 Tél. +33 476 929 117

REFERENCE DE LA L/C : 028ICD0002121099 DU 211130

WINOA - S.A. au capital de 61.727.840 EUR - RCS Grenoble B 061 500 864
 528, avenue de Savoie - 38570 Le Cheylas - FRANCE - Tel: +33(0)4.76.92.9 / 1.17

Annexe 04:

Les Sélections
Techniques de l'ingénieur

DOSSIER
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR
l'expertise technique et scientifique de référence

m1494 •
Décapage mécanique par grenailage

Par :
René PRONER

Ce dossier fait partie de la base documentaire
[Archives] Traçabilité
dans le thème
et dans l'univers Archives

Document délivré le 26/06/2012
Pour le compte
7200092269 - cerist // 193.194.76.5

Pour toute question
Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20

