

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Laboratoire de Génie des Procédés

Mémoire



Présenté par

Drissi Litissia Meriem

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

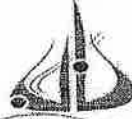
Influence de la chaux vive sur les propriétés d'un mortier

A présenter le 21/09/2023

Devant le jury composé de :

M. AOUDJIT F.	MCA	UAMO, Bouira	Président
Mme HADIOUCHE D.	MCB	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mme MANSOURI L.	MAA	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mme ZAABAR A.	MCA	UAMO, Bouira	Encadrante
M. ALAM A.	Ingénieur	GICA, Bouira	Invité

Année Universitaire 2022/2023



التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) جر. بيسي. ليمسيامريم الصفة: طالب (ماستر / دكتوراه)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 406442877 والصادرة بتاريخ: 2023/07/21

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم الإنسانية قسم العلوم الإنسانية تخصص: كيمياء

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Influence de la chaux vive sur les paramètres d'un mortier.

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 20/09/2023

توقيع المعني (ة)

جر. بيسي. ليمسيامريم

20/09/2023 البويرة في

هيئة مراقبة السرقة العلمية:



% 22

النسبة:



Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a donné la force et le courage pour pouvoir atteindre ce niveau.

En seconde position, je tiens à remercier ma promotrice Madame ZAABAR pour son aide, pour sa motivation et pour ses compétences.

Mes vifs remerciements vont au chef du département de Génie des Procédés Monsieur KERNANI et Madame HADIOUCHE qui m'ont soutenu, motivé et encouragé durant tout mon parcours universitaire.

Je tiens également à remercier mes chers enseignants de la spécialité pour leurs conseils, soutiens et pour leurs enseignements de qualité.

Je remercie tout le personnel de la société GICA GROUPE de Sour El-Ghozlane pour leur accueil chaleureux et précieux aides qui ont porté tout au long de mon stage.

Un grand merci à Madame Fouzia qui m'a beaucoup facilité l'accomplissement des tâches qui m'ont été confiés.

J'exprime ma gratitude envers les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail, et pour leurs remarques constructives et conseils nécessaire à la mise en forme de mon mémoire.

Enfin, à tous ceux qui m'ont apporté de l'aide, du soutien et de la motivation pour la réalisation de mon Projet de Fin d'Etudes.

Dédicaces

Je dédié cet humble et modeste travail :

A ma chère mère

A mon cher père

A ma chère grand-mère adorée

*Qui n'ont jamais cessé de formuler des
prières à mon égard, de me soutenir et de
m'épauler pour que je puisse atteindre mes
objectifs.*

*A mon frère et mes deux sœurs adorées qui
ont été toujours présent à mes côtés.*

A Mes chères copines : Katia, Lydia et Halla.



Litissia Meriem

Listes des abréviations

C.E.T.I.M : Centre d'Etude et de service Technologiques de l'Industrie des Matériaux de constructions.

CaO : chaux.

CaOL : chaux libre.

CH1 : désigne la chaux produite à partir du calcaire à une température de cuisson de 900 °C.

CH2 : désigne la chaux produite à partir du calcaire a une température de cuisson de 1000 °C.

CH3 : désigne la chaux produite à partir du calcaire à une température de cuisson de 1100 °C.

CL 70 : chaux calcique avec une teneur en CaO + MgO supérieure à 70 %.

CL 90 : chaux calcique avec une teneur en CaO + MgO supérieure à 90 %.

CPA : Ciment Portland Artificielle.

FT : Fraction Totale.

Ins : résidus insoluble.

MgO : oxyde de Magnésium

Moy. : moyenne.

P4 : Répartition granulaire.

PF : Perte au Feu.

Q : Chaux vive. **R2** : $t_{40} < 25$: La température d'extinction qui dépasse 40 °C en moins de 25 minutes.

R5 : $t_{60} < 10$: La température d'extinction qui dépasse 60 °C en moins de 10 minutes.

Liste des tableaux

Chapitre I : Recherche Bibliographique

TABLEAU I.1 : COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CLINKER.....	9
TABLEAU I.2 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FUMEE DE SILICE [12]	12

Chapitre II : Matériel et Méthodes

TABLEAU II.1 : OPTIMISATION DE CUISSON DES CALCAIRES	31
TABLEAU II.2 : LES DIFFERENTS MORTIERS A CONFECTIONNER	35

Chapitre III : Résultats et Discussions

TABLEAU III.1 : COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT CPA	38
TABLEAU III.2 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CIMENT CPA	38
TABLEAU III.3 : COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CALCAIRE	39
TABLEAU III.4 : RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUE DE LA CHAUX OBTENUE	40
TABLEAU III.5 : RESULTATS DES ESSAIES CHIMIQUES DES CHAUX OBTENUES.....	41
TABLEAU III.6 : INTERPRETATION DES RESULTATS	41
TABLEAU III.7 : ANALYSE CHIMIQUE DES DIFFERENTS CONSTITUANTS PREPARES	42
TABLEAU III.8 : RESULTATS DE COMPRESSION ET FLEXIONS DU CPA	43

Liste des Figures

Chapitre I : Recherche Bibliographique

FIGURE I.1 MATIERES PREMIERES ET COMPOSITION DE CIMENT. A- SABLE + MINNERIE DE FER, B- CALCAIRE ET C- ARGILE.	5
FIGURE I.2 : PRESENTATION DU FOUR.	7
FIGURE I.3 : EXPEDITION DE CIMENT.	8
FIGURE I.4 : COURBES POROSIMETRIQUES MONTRANT L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE CENDRES VOLANTES AU COURS DU TEMPS [10].	11
FIGURE I.5 : COURBES POROSIMETRIQUES MONTRANT L'INFLUENCE DE L'AJOUT DES FUMEEES DE SILICE SUR LA DIMENSION DES PORES EN FONCTION DU TEMPS D'HYDRATATION [18].	13
FIGURE I.6 : CSH FIBREUX AVEC CRISTAL DE PORTLANDITE (X) ENTRE DES CSH (#), LA POROSITE EST REPEREE PAR (O).	15
FIGURE I.7 : MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE, ETTRINGITE ACICULAIRE (AIGUILLE) DANS UN BETON.	16
FIGURE I.8 : PRESENTATION D'UN MORTIER.	17
FIGURE I.9 : MORTIER CIMENT.	19
FIGURE I.10 : MORTIER HYDROFUGE UTILISER EN DECORATION.	20
FIGURE I.11 : MORTIER REFRACTAIRE.	20
FIGURE I.12 : MORTIER A CHAUX.	21
FIGURE I.13 : CHAUX AERIENNE.	21
FIGURE I.14 : CHAUX HYDRAULIQUE.	22
FIGURE I.15 : MORTIER COLLE.	22

Chapitre II : Matériel et Méthodes

FIGURE II.1 : ESSAI DE PRISE VICATORNIC.	29
FIGURE II.2 : CHAUX VIVE.	32
FIGURE II.3 : PESER DE LA CHAUX VIVE.	32
FIGURE II.4 : PESER DU CIMENT CPA.	32
FIGURE II.5 : MALAXEUR.	33
FIGURE II.6 : APPAREIL QUI FIXE LE MORTIER.	34
FIGURE II.7 : LE MOULE DU MORTIER.	34

FIGURE II.8 : CONSERVATION DU MORTIER.....	35
FIGURE II.9 : APPAREIL DE MESURE DE LA RESISTANCE MECANIQUE DU MORTIER.....	36

Chapitre III : Résultats et Discussions

FIGURE III.1 : RESULTATS DE FLEXION DU MORTIER A 5 % A DIFFERENTS TEMPS DE CONSERVATION.	43
FIGURE III.2 : RESULTATS DE COMPRESSION DE MORTIER A 5 %.....	44
FIGURE III.3 : RESULTATS DE FLEXION (EN N/MM ²) DU MORTIER A 10 % A DIFFERENTS TEMPS DE CONSERVATION.	44
FIGURE III.4 : RESULTATS DE COMPRESSION DU MORTIER A 10 %.	45
FIGURE III.5 : RESULTATS DE FLEXION (EN N/MM ²) DU MORTIER A 15 % A DIFFERENTS TEMPS DE CONSERVATION.	45
FIGURE III.6 : RESULTATS DE COMPRESSION DE MORTIER A 15%.....	46
FIGURE III.7 : RESULTATS DE FLEXION (EN N/MM ²) DU MORTIER A 20 % DE LA CHAUX VIVE EN FONCTION DU TEMPS DE CONSERVATION.	46
FIGURE III.8 : RESULTATS DE COMPRESSION DE MORTIER A 20 %.....	47
FIGURE III.9 : RESULTATS DE COMPRESSION EN FONCTION DE CHAUX VIVE ET CPA APRES 2 MOIS DE CONSERVATION.	48

Table des Matières

<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>
------------------------------------	----------

Chapitre 1 : Recherche Bibliographique

I.1 Généralités sur le ciment.....	3
I.1.1 Introduction	3
I.1.2 Histoire du ciment	3
I.1.3 Définition du ciment.....	4
I.1.4 Matières premières et composition de ciment.....	4
I.1.5 Procédé de fabrication du ciment	5
I.1.5.1 Séchage et broyage	5
I.1.5.2 Broyage du clinker.....	6
I.1.5.3 Expéditions	7
I.1.6 Constituants du ciment	8
I.1.6.1 Le Clinker	8
I.1.6.2 Le gypse (CaSO_4)	10
I.1.6.3 Les ajouts Cimentaires	10
I.1.7 Hydratation du ciment	13
I.1.7.1 Hydratation du silicate tricalcique C_3S	14
I.1.7.2 Hydratation de bi calcique C_2S	15
I.1.7.3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A	15
I.1.7.4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF	16
I.2 Caractéristiques principales d'un mortier	16
I.2.1 Introduction	16
I.2.2 Définition	17
I.2.3 Composition	17
I.2.4 Types de mortier.....	18
I.2.4.1 Mortier-ciment.....	18
I.2.4.2 Mortier-hydrofuge	19
I.2.4.3 Mortier réfractaire.....	20
I.2.4.4 Mortier de chaux.....	20

I.2.4.5 Mortier-colle	22
I.2.5 Classification des mortiers	23
I.2.5.1 Selon leur domaine d'utilisation	23
I.2.5.2 Selon la composition	23
I.2.6 Classes des mortiers	24
I.3 Rappels sur la chaux vive	24
I.3.1 Introduction	24
I.3.2 Définition	25
I.3.3 Caractéristique de la chaux vive.....	25
I.3.3.1 Réactivité chimique	25
I.3.3.2 Stabilité thermique.....	25
I.3.3.3 Pouvoir alcalin.....	25
I.3.3.4 Absorption de dioxyde de carbone	25
I.3.4 Utilisation dans la construction	26
I.3.5 Composition de la chaux vive	26
I.4 Conclusion	27

Chapitre II : Matériel et Méthodes

II.1 Introduction	28
II.2 Ciment	28
II.2.1 Caractéristiques physiques des pâtes de ciment.....	28
II.2.2 Essai de prise.....	29
II.2.3 Compositions physique et minéralogique du ciment portland artificielle (CPA)	29
II.3 Le sable	29
II.4 Chaux vive.....	30
II.4.1 Essais réalisés sur la matière première.....	30
II.4.2 Essais réalisés sur le produit fini.....	30
II.4.3 Optimisation de cuisson des calcaires.....	31
II.5 Formulation des mortiers.....	31
II.5.1 Constituants.....	31
II.5.2 Mode opératoire	32
II.5.3 Essais Mécaniques	35

II.6 Conclusion	37
-----------------------	----

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1 Introduction	38
III.2 Analyse chimique et minéralogique	38
III.2.1 Composition chimique et minéralogique du ciment portland artificielle	38
III.2.2 Composition chimique et minéralogique du calcaire	39
III.3 Résultats des essais physico-chimiques de la chaux obtenue.....	39
III.4 Résultats des essais chimiques des chaux obtenues	40
III.5 Interprétation	41
III.6 Analyse chimique des différents constituants préparés.....	42
III.7 Résultats de compression et de flexions.....	42
III.7.1 Ciment portland artificielle (CPA)	42
III.7.2 Mortier à 5 %	43
III.7.3 Mortier à 10 %	44
III.7.4 Mortier à 15 %	45
III.7.5 Mortier à 20 %	46
III.8 Interprétation des résultats de flexion et de compression	47
III.9 Conclusion.....	48

<i>Conclusion Générale & Perspectives</i>	<i>50</i>
---	-----------

<i>Références Bibliographiques.....</i>	<i>51</i>
---	-----------

Introduction Générale

L'essor mondial que connaît l'industrie du ciment a conduit au développement de nouvelles formules dans le but d'arriver à des produits écologiques et économiques tout en réduisant les coûts de fabrication et en respectant l'environnement.

Il existe différents types de ciments, chacun est adapté à des applications spécifiques. Par exemple, le ciment Portland est le type le plus courant et est utilisé dans une variété de projets de construction. Il en existe d'autres, comme le ciment alumineux, le ciment de haut fourneau, le ciment pouzzolanique, etc., chacun ayant des propriétés particulières adaptées à certaines conditions et exigences. Ainsi, les ajouts tels que (la pouzzolane, les cendres volantes, etc.) font actuellement partie des développements les plus récents dans la production des matériaux cimentaires (mortiers et bétons) du fait de ce qu'ils peuvent leur apporter comme amélioration des propriétés physico-chimiques et mécaniques ainsi que leur rôle qu'ils peuvent jouer dans l'enjeu économique et environnemental par substitution d'une partie de clinker qui est l'élément de base dans la production des ciments. En effet, les ajouts peuvent améliorer la résistance des ciments, leur incorporation peuvent réduire les coûts liés à la fabrication du clinker et réduire également l'empreinte carbone qui est liée directement à sa fabrication. En matière de durabilité, les ajouts ont prouvé leur efficacité à réduire la perméabilité et la résistance aux fissurations dues aux conditions atmosphériques.

Cependant, le choix des ajouts dépend des besoins spécifiques de chaque projet de construction, en contribuant d'une manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail illustre l'influence de la chaux vive sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression et de flexion) des mortiers à base de ciment ordinaire et du sable. L'idée principale consiste à fabriquer des mortiers à divers pourcentages de chaux vive, à savoir 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, et de déterminer la limite de son utilisation possible en comparant les résultats avec ceux d'un mortier ordinaire, pris comme référence.

Les matériaux utilisés sont :

- Chaux vive issue du centre d'étude et des services technologiques de l'industrie des matériaux de construction C.E.T.I.M-Boumerdés.
- Ciments de la société des ciments de Sour el Ghoulane (GICA) (CEM I 52.5 N).

Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur le ciment et les caractéristiques principales d'un mortier. On a aussi abordé des rappels sur la chaux vive.

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 chapitre est réservé aux résultats obtenus et à leurs interprétations.

Enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus et les perspectives à entreprendre pour approfondir cette étude.

Chapitre 1

Recherche Bibliographique

I.1 Généralités sur le ciment

I.1.1 Introduction

Le ciment est un matériau liant hydraulique couramment utilisé dans le domaine de la construction ainsi que dans la réalisation de projets d'envergure, souvent caractérisés par leur conception audacieuse. Il est fabriqué à partir d'un mélange finement broyé et homogénéisé qui combine un composant de base appelé « clinker » avec des ajouts tels que « le gypse ». Le ciment a la particularité de réagir à l'hydratation en présence d'eau, un processus qui transforme la pâte initiale, ayant une consistance relativement fluide, en une substance solide insoluble dans l'eau. Cette réaction d'hydratation est principalement provoquée par certains composants chimiques minéraux présents dans le ciment, notamment les silicates.

I.1.2 Histoire du ciment

Les premiers à fabriquer des liants hydrauliques capables de durcir sous l'eau étaient probablement les Romains. Ils réalisaient cela en mélangeant de la chaux avec des cendres volcaniques provenant de la région de Pouzzoles. C'est de là que provient le terme bien connu de "pouzzolanique", désignant un matériau capable de fixer la chaux en présence d'eau. Néanmoins, la propriété d'hydraulicité de ce mélange est restée inexpliquée jusqu'aux travaux de Louis Vicat en 1817, lorsqu'il a développé la théorie de l'hydraulicité et partagé les résultats de ses recherches.

Le ciment, matériau emblématique du 20^e siècle, a des origines centenaires. En 1824, l'Écossais Aspdin a obtenu un brevet pour la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il a appelé "ciment Portland", en raison de sa ressemblance avec la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland une fois durci. C'est le premier ciment, ancêtre d'une longue lignée. Le 20^e siècle a ainsi marqué l'avènement des ciments artificiels, qui ont progressivement supplanté les chaux. Cette transition s'est accélérée après la Deuxième Guerre Mondiale, lorsque le secteur de la construction a principalement produit des logements neufs construits à partir d'éléments préfabriqués, n'utilisant plus la chaux.

C'est à cette époque charnière que la chaux a commencé à être délaissée, son ancienneté étant perçue comme archaïque alors que les ciments amélioraient les performances des liants, accélérant leur mise en œuvre et ouvrant la voie à une modernité que chaque maçon devait inévitablement suivre. Le développement a été rendu possible grâce à l'introduction de

nouveaux équipements, notamment les fours rotatifs et les broyeurs à boulets. Les procédés de fabrication n'ont cessé de se perfectionner. En 1870, il fallait 40 heures pour produire une tonne de clinker, composant de base du ciment, tandis qu'actuellement, cela prend environ 3 minutes. [1].

I.1.3 Définition du ciment

Un ciment est un liant hydraulique élaboré, communément utilisé en construction mais aussi pour la réalisation des grands ouvrages de conception souvent audacieuse. Le ciment est un mélange finement broyé et homogénéisé qui est préparé à partir d'un constituant de base (le clinker) et d'ajouts tels que le gypse. Il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau, cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus au moins fluide, en un solide insoluble dans l'eau [2].

I.1.4 Matières premières et composition du ciment

Les matières premières, en l'occurrence mélange calcaire et argile, sont exploités à partir des carrières de la cimenterie. Les ajouts de correction (sable et minerai de fer) et les ajouts au ciment gypse qui est considéré comme un régulateur de prise. Généralement dans la production de ciment, on utilise quatre matières premières : calcaire à 80 %, argile à 17 %, sable à 2 % et minerai de fer à 1 %.

Les blocs de matières sont acheminés vers des concasseurs puis stockés dans un hall de stockage tel que :

- **Sable** : Il est transporté par des camions vers l'usine à partir de wilaya de BOUSSAADA.
- **Minerai de fer** : Il est transporté par des camions vers l'usine à partir de la mine de la Wilaya de SETIF.
- **Le gypse** : Il provient de la carrière d'EL HAKIMIA (SEG) et de la carrière de MEDEA.

Ses matières premières composées essentiellement de chaux (CaO), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux est apportée généralement par les roches de calcaire. L'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles.



FIGURE I.1 MATIERES PREMIERES ET COMPOSITION DE CIMENT.

A- SABLE + MINNERIE DE FER, **B-** CALCAIRE ET **C-** ARGILE.

I.1.5 Procédé de fabrication du ciment

Le ciment est fabriqué à partir de l'oxyde de calcium (CaO), des oxydes de silices (SiO_2), d'aluminium (Al_2O_3) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3), qui se lient au clinker pendant la cuisson dans le four. Cependant, on peut aussi trouver dans les matières premières d'autres composants indésirables, en petites quantités, tel que la magnésie MgO et les alcalines, mais ils sont inévitables.

Le CaO est le principal composant du ciment. Il ne se trouve pas à l'état libre mais dans le calcaire et la craie sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3). A la cuisson dans le four, CaCO_3 se décompose suivant la formule :



Le dioxyde de carbone, CO_2 gazeux disparaît lors du processus de fabrication lorsque l'oxyde de calcium CaO participe à la clinkérisation. SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 se trouvent dans le sable, l'argile et la marne [3].

I.1.5.1 Séchage et broyage

Pour faciliter les réactions chimiques ultérieures, il est nécessaire de préparer les matières premières en les séchant et en les réduisant en une fine poudre (de l'ordre de quelques microns). Cette opération est réalisée à l'aide de broyeurs à boulets ou de broyeurs à meules verticaux. Les broyeurs à meules verticaux, plus modernes, présentent des avantages en termes d'efficacité énergétique et de séchage plus efficace. En effet, il existe trois procédés : procédé humide, procédé sec et procédé semi-sec.

Le procédé humide, le plus ancien, implique une consommation élevée d'énergie pour évaporer l'excès d'eau.

Au cours de ces procédés, les matières premières sont parfaitement mélangées et séchées pendant l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Cette farine peut être directement introduite dans le four sous forme de poudre (procédé sec) ou préalablement transformée en granules par humidification (procédé semi-sec).

La cuisson est effectuée à une température d'environ 1450 °C dans un four rotatif, un long cylindre en rotation à une vitesse de 1,5 à 3 tours par minute, légèrement incliné. Les matières premières progressent lentement à travers le four, préchauffant le matériau cru à environ 800 °C. À la sortie du four, un refroidisseur à grille est utilisé pour refroidir les nodules incandescents et les ramener à une température d'environ 100 °C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques se produit pour former le clinker.

- La décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) conduit à la formation de chaux vive.
- L'argile se décompose en ses composants silice et alumine, qui réagissent ensuite avec la chaux pour former des silicates.

I.1.5.2 Broyage du clinker

Afin de produire du ciment ayant des propriétés hydrauliques actives, il est nécessaire de broyer le clinker de manière très fine. Ce processus de broyage est réalisé dans des broyeurs à boulets, où des billes d'acier entrent en collision avec les grains de clinker, les réduisant progressivement en une poudre fine. Le résultat final est une fine farine de ciment qui contient très peu de particules supérieures à 80 microns.

À la sortie du broyeur, un cyclone est utilisé pour séparer les particules suffisamment fines de celles qui sont plus grosses, ces dernières étant renvoyées à l'entrée du broyeur pour un broyage supplémentaire si nécessaire. Pendant le processus de broyage, le gypse (à hauteur de 3 à 5 %) est ajouté au clinker, jouant un rôle essentiel dans la régulation du temps de prise du ciment. Cela donne naissance au ciment "Portland".

Les ciments contenant des "ajouts" sont créés en incorporant, lors du broyage du clinker, des éléments minéraux supplémentaires. Ces éléments peuvent provenir de diverses sources, telles que les laitiers de hauts fourneaux, les cendres issues de centrales thermiques, les fillers

calcaires ou les pouzzolanes naturelles. Cette démarche permet de produire différentes catégories de ciments adaptées à une gamme variée de projets de construction, qu'ils soient courants ou plus exigeants.



FIGURE I.2 : PRESENTATION DU FOUR.

I.1.5.3 Expéditions

Après le processus de broyage, le ciment adopte sa forme finale, telle que nous le voyons sur les chantiers de construction. À ce stade, il est entreposé dans des silos verticaux qui nécessitent un entretien régulier. En effet, avec le temps, le ciment a tendance à se dessécher dans les silos et à s'accumuler. Il est donc essentiel de maintenir un flux constant de ciment à l'intérieur des silos pour éviter toute stagnation indésirable. Pour ce faire, un système d'injection d'air est installé, avec une pression plus élevée à l'extérieur du silo et moins élevée vers le centre. De plus, un aspirateur d'air est positionné en tête du silo pour dégonfler son contenu. Grâce à ce processus, le ciment acquiert les caractéristiques d'un fluide et ne risque plus de s'agglutiner, ce qui permet d'éviter d'importantes pertes.

L'extraction du ciment des silos s'effectue ensuite au moyen d'un bec verseur. Par la suite, les ciments quittent l'usine sous forme de sacs ou en vrac pour être utilisés dans diverses applications [4].



FIGURE I.3 : EXPEDITION DE CIMENT.

I.1.6 Constituants du ciment

I.1.6.1 Le Clinker

Le ciment est obtenu par le processus de broyage de plusieurs composants, dont le plus crucial est le clinker, composé de silicates et d'aluminates de chaux. Dans la zone de clinkérisation du four, les éléments simples tels que le CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 réagissent pour former les constituants minéraux suivants :

- Silicate tricalcique (C3S) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (connu sous le nom d'Alite),
- Silicate dicalcique (C2S) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (appelé Belite),
- Aluminate tricalcique (C3A) : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,
- Ferro-aluminate calcique (C4AF) : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (connu sous le nom de Célide).

TABLEAU I.1 : COMPOSITION CHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE DU CLINKER.

Composants	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne (%)
Composants minéralogiques		
C3S	40-70	60
C2S	00-30	15
C3A	02-15	08
C4AF	00-15	08
Oxydes		
CaO	60-69	65
SiO ₂	18-24	21
Al ₂ O ₃	04-08	06
Fe ₂ O ₃	01-08	03
MgO	< 05	02
K ₂ O, Na ₂ O ₃	< 02	01
SO ₃	< 03	01

On peut observer que les quatre oxydes, à savoir le CaO, le SiO₂, l'Al₂O₃ et le Fe₂O₃, constituent plus de 95 % de la composition chimique du clinker, ce sont donc les principaux oxydes présents, appelés oxydes majeurs. En ce qui concerne les oxydes mineurs les plus significatifs dans la composition du ciment, on retrouve :

- La magnésie (MgO), qui provient généralement de la dolomite, souvent présente aux côtés du calcaire.
- Les oxydes alcalins K₂O et Na₂O, qui sont généralement issus de l'argile et des feldspaths.
- L'anhydride sulfurique (SO₃) présent dans le clinker, qui provient de diverses sources, telles que la pyrite (FeS₂), mais également du calcaire, de l'argile, et en particulier des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou le gaz naturel.

I.1.6.2 Le gypse (CaSO_4)

Le clinker "pur" très fin se caractérise par des délais de prise très courts, de l'ordre de trois à cinq minutes, ce qui le rend pratiquement inutilisable. Cette caractéristique est principalement attribuée à la célite (C3A), qui s'hydrate rapidement et forme rapidement des hydrates compacts qui cristallisent. Par conséquent, pour retarder le processus de prise du ciment, il est nécessaire de transformer les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Le gypse joue un rôle crucial à cet égard, car il réagit vigoureusement avec l'hydroaluminate tricalcique, formant ainsi un sel insoluble appelé l'hydrosulfoaluminate de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$).

La quantité de gypse à incorporer doit être en adéquation avec la proportion de C3A présente dans le liant, et lorsque cette proportion de gypse est respectée, elle inhibe l'activité des hydroaluminates de calcium dès le début du processus [5].

I.1.6.3 Les ajouts Cimentaires

Depuis les années 1980, les compositions du béton traditionnel, qui se limitaient à des granulats, du ciment et de l'eau, sont devenues rares. Les formulations courantes incluent désormais des ciments avec des ajouts, ainsi que des adjuvants ou des charges ultrafines comme la fumée de silice. L'intégration d'ajouts cimentaires diversifie la composition des bétons, permettant ainsi d'obtenir différentes propriétés tout en réduisant les coûts de production.

Les ajouts cimentaires sont des poudres minérales obtenues par le concassage de matières premières naturelles ou de sous-produits industriels. Leur granulométrie est similaire à celle du ciment, voire plus fine. Ils peuvent présenter des caractéristiques hydrauliques latentes, pouzzolaniques ou être chimiquement inertes. Quoi qu'il en soit, en raison de leur finesse, ces particules jouent un rôle actif dans la compacité, la viscosité et par conséquent, la durabilité du matériau [6].

a. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des poudres extrêmement fines qui résultent de la combustion de charbon dans des centrales thermiques. Au cours de la combustion, pratiquement toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés. Les impuretés présentes dans le charbon, telles que l'argile, le feldspath et le quartz, fondent et sont évacuées de la chambre de combustion par les gaz d'échappement [7]. Au cours de cette phase, le matériau fondu refroidit

et se solidifie en petites particules sphériques vitreuses appelées Cendres Volantes (CV). La cendre volante est ensuite extraite des gaz d'échappement à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou de sacs filtrants.

La composition principale de la cendre volante est du verre de silicate, comprenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les éléments mineurs comprennent le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone [7]. L'alcalinité de la solution interstitielle du ciment favorise la dissolution rapide des particules de cendres, accélérant ainsi leur processus d'hydratation [8].

L'incorporation de cendres volantes dans le ciment conduit à une diminution de la perméabilité ainsi que des coefficients de diffusion dans les pâtes de ciment [9]. Feldman a conduit des essais sur des pâtes cimentaires dans lesquelles 35 % du ciment a été remplacé par des cendres volantes, tout en maintenant le même rapport eau/liant [10]. Après une période d'hydratation de 28 jours, les résultats indiquent une réduction de la perméabilité et de la diffusivité de l'ordre de 2 à 5.

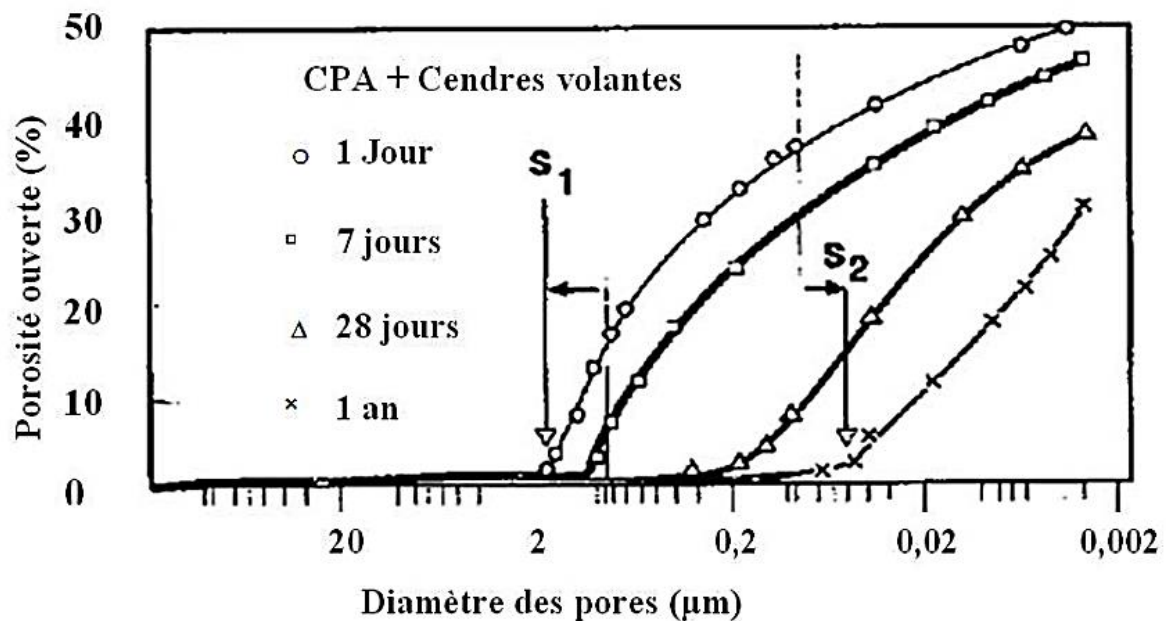


FIGURE I.4 : COURBES POROSIMÉTRIQUES MONTRANT L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE CENDRES VOLANTES AU COURS DU TEMPS [10].

La figure I.4 met en œuvre la capacité réactive des cendres volantes à intensifier le processus d'hydratation du clinker tout en affinant davantage la distribution des pores, créant ainsi une barrière contre les agressions chimiques.

b. Les fumés de silice

Les Fumées de Silice (FS) sont des dérivés industriels issus de la production de silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium. Elles sont principalement constituées de dioxyde de silicium amorphe et se présentent sous forme de minuscules particules sphériques, avec un diamètre moyen d'environ 0,1 μm . Les fumées de silice sont générées lors de la réduction de quartz extrêmement pur par du charbon dans un four à arc électrique. Elles sont collectées en filtrant les gaz émis lors de la combustion [11]. Cette vapeur oxydée s'élève à partir de fours chauffés à 2000 °C. Après refroidissement, elle se condense et est captée dans des poches de tissu. Ensuite, elle est traitée pour éliminer les impuretés et réguler la taille des particules. Le tableau I.2 présente la composition chimique typique des fumées de silice.

TABLEAU I.2 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FUMEE DE SILICE [12].

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	MnO (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	PAF (%)
FS	94,17	0,21	0,32	0,50	0,47	0,12	0,07	1,17	-	0,04	2,77

Leur surface spécifique oscille entre 20 à 25 m²/g. La finesse et la nature vitreuse des fumées de silice les rendent très réactives. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95 % [13]. Par réaction pouzzolanique ou par influence sur les conditions de germination des hydrates, la structure des C-S-H est altérée. Initialement, la fumée de silice agissait comme une pouzzolane, réagissant avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment Portland pour produire des silicates de calcium hydratés (C-S-H) supplémentaires [14]. Cependant, la fumée de silice n'est pas seulement une pouzzolane très réactive ; elle possède d'autres propriétés intéressantes. En effet, la petite taille des particules de fumée de silice permet de remplir les espaces entre les grains de ciment, améliorant ainsi le comblement des vides [15]. La figure I.6 illustre l'effet bénéfique de l'ajout de fumées de silice par rapport au ciment Portland ordinaire, pour un rapport eau/ciment de 0,25.

De plus, la fumée de silice améliore les caractéristiques physiques du béton, telles que la résistance en compression, la résistance au gel-dégel, la résistance à la pénétration des ions chlore, la résistance aux attaques par les sulfates et la résistance à la réaction alcali-granulat [14, 16]. En remplaçant le ciment, les fumées de silice ont généralement pour effet de réduire la perméabilité à l'air et à l'eau. Ce phénomène s'explique par le raffinement et la segmentation

de la porosité capillaire engendrés par l'hydratation des sphères de fumée de silice. Le taux de substitution optimal se situe généralement aux alentours de 10 % [17].

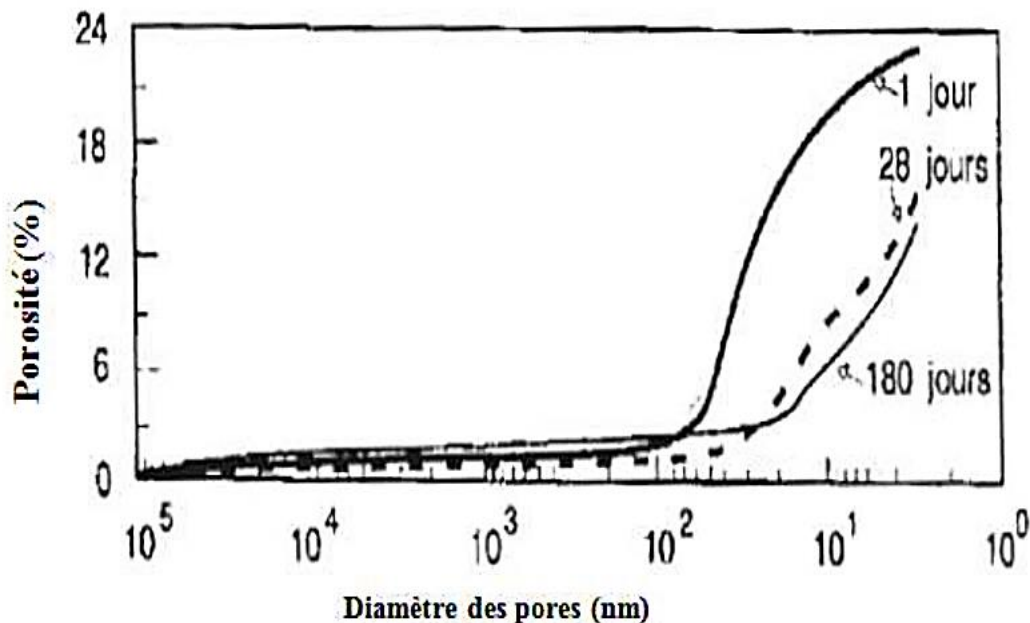


FIGURE I.5 : COURBES POROSIMÉTRIQUES MONTRANT L'INFLUENCE DE L'AJOUT DES FUMÉES DE SILICE SUR LA DIMENSION DES PORES EN FONCTION DU TEMPS D'HYDRATATION [18].

b. Les additions calcaires

Ces additions sont produites en effectuant un broyage fin de roches calcaires. Contrairement aux réactions chimiques, elles sont généralement désignées sous le terme de fillers calcaires, du fait de leur fonction de remplissage des vides. Ces ajouts contribuent à renforcer la densité du béton, améliorant ainsi ses propriétés mécaniques.

I.1.7 Hydratation du ciment

Le concept d'hydratation englobe l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ce processus démarre dès que les deux phases entrent en contact. Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été élucidés dès la fin du 19^{ème} siècle par Henri Le Chatelier en 1887. Il a notamment décrit trois étapes liées à la prise du ciment :

1. Dissolution des composants du ciment ;
2. Formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates ;

3. Précipitation.

I.1.7.1 Hydratation du silicate tricalcique C₃S

Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, cela entraîne la formation de gels de silicate de calcium hydraté ainsi que de l'hydroxyde de calcium. La réaction du C₃S avec l'eau est la suivante :



Où,

$$\left\{ \begin{array}{l} CSH \text{ représente le } 3CaO.2SiO_2. 3H_2O \text{ (Silicate de calcium hydraté),} \\ CH \text{ représente le } Ca(OH)_2 \text{ (Portlandite).} \end{array} \right.$$

Les produits formés pendant le processus d'hydratation du C₃S (comme illustré dans la figure I.7) sont les suivants :

4. Les silicates de calcium hydratés (CSH), qui représentent environ 60 à 70 % du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils se présentent sous forme de feuillets composés de cristaux très petits et peu cristallisés, offrant une surface spécifique très élevée (de 100 à 700 m²/g). La cohésion des feuillets de CSH résulte des forces de Van Der Waals agissant entre parties colloïdales.

5. L'autre composant majeur dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium (CH ou Portlandite), qui occupe environ 20 à 25 % du volume des solides dans une pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite se présente sous une forme prismatique hexagonale. Cependant, elle contribue peu au développement de la résistance du ciment. En réalité, la présence de la portlandite peut être problématique car elle est hautement soluble et susceptible d'être attaquée par des acides et des sulfates [19].

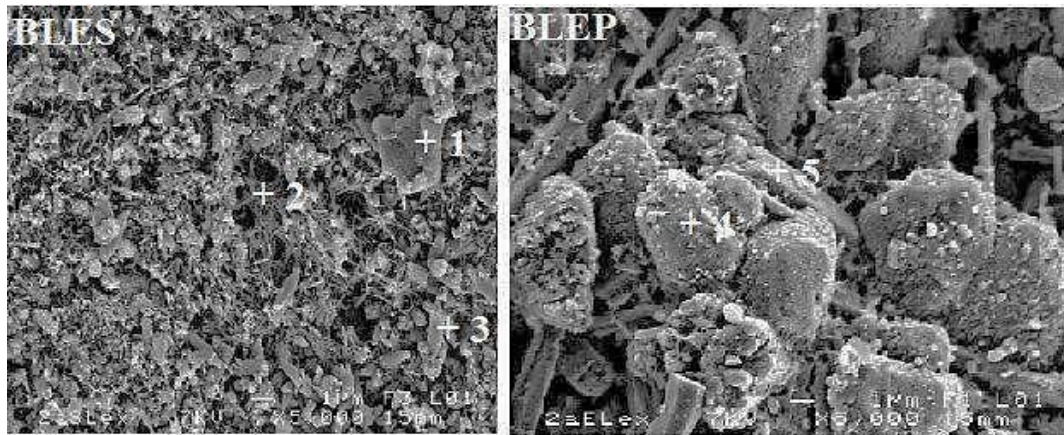


FIGURE I.6 : CSH FIBREUX AVEC CRISTAL DE PORTLANDITE (X) ENTRE DES CSH (#), LA POROSITE EST REPEREE PAR (O).

I.1.7.2 Hydratation de bicalcique C₂S

Après son hydratation, le C₂S génère également des silicates de calcium hydratés (CSH). La réaction se présente comme suit :



Les études calorimétriques ont révélé des résultats similaires à ceux de l'hydratation du C₃S, mais avec une libération de chaleur moins importante. Selon des calculs stœchiométriques, l'hydratation du C₃S conduirait à la formation de 61 % de gel de CSH et 39 % de CH, tandis que l'hydratation du C₂S entraînerait la création de 82 % de gel de CSH et seulement 18 % de CH. Par conséquent, une plus grande quantité de C₂S dans le ciment entraînerait une augmentation de sa résistance. Cependant, pour obtenir une résistance à un stade précoce, une quantité plus importante de C₃S serait nécessaire en raison de sa réactivité accrue.

I.1.7.3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄.2H₂O). En l'absence de gypse, la réaction du C₃A avec l'eau est extrêmement vigoureuse et conduit à un durcissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. Cependant, en présence de gypse, les C₃A réagissent initialement pour former de l'ettringite, un trisulfoaluminate hydraté, qui cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (comme illustré dans la figure I.7). La réaction se présente comme suit :

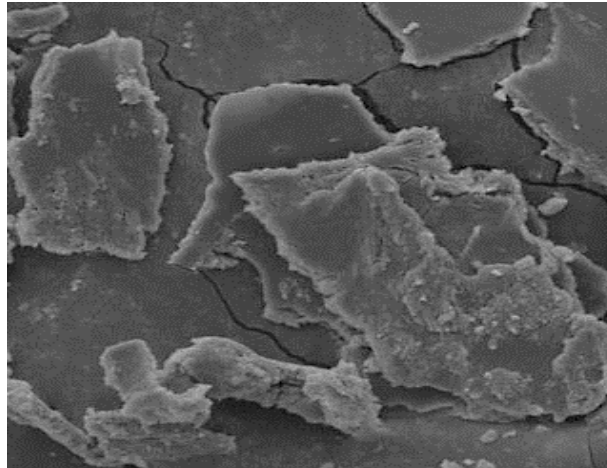
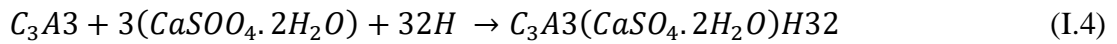
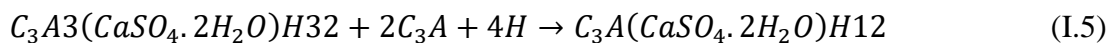


FIGURE I.7 : MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE, ETTRINGITE ACICULAIRE (AIGUILLE)
DANS UN BETON.

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5 % en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. Il apparaît en conséquence secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [20]. La réaction est :



Les aluminates hydratés obtenus de cette manière représentent environ 15 à 20 % du volume total de la pâte de ciment complètement hydratée [21].

I.1.7.4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF

Le C₄AF réagit avec le gypse d'une manière similaire à celle du C₃A, mais dans ce cas, la réaction se déroule beaucoup plus lentement. Au cours de la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium, qui réagit ensuite avec l'excès de C₄AF pour former une forme basse de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates représentent environ 15 à 20 % du volume des solides dans la pâte. Il convient de noter que la réaction du C₄AF génère peu de chaleur et contribue de manière limitée au développement de la résistance. L'hydratation des aluminates revêt une grande importance pratique vu son influence sur les propriétés de prise du ciment [19].

I.2 Caractéristiques principales d'un mortier

I.2.1 Introduction

Le mortier est un matériau composite, obtenu par mélange homogène d'une matière inerte (sable) avec une matière active (liant), le tout gâché avec une certaine quantité d'eau. Le mortier pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction. Toutefois, il n'existe pas de mortier universel, convenant à toutes les situations. Le concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leurs propriétés.

I.2.2 Définition

Le mortier est un matériau de construction obtenu par mélange de liant, de sable et d'eau, éventuellement des adjuvants, réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de plasticité convenable pour sa mise en œuvre. Il sert à lier les différents éléments de construction tels que des briques, des pierres, des blocs de béton (parpaings) ou à exécuter des revêtements et des enduits de façade.



FIGURE I.8 : PRESENTATION D'UN MORTIER.

I.2.3 Composition

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau ; éventuellement des adjuvants.

- Liants : peut-être du ciment portland, de la chaux ou du ciment de maçonnerie, ou un des divers mélanges de ces matériaux.

- La chaux : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un excellent pouvoir de rétention d'eau, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.

- Le ciment de maçonnerie : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

- Les adjuvants : donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.

- Granulats : Le sable est le granulat le plus fréquemment employé. Il est inerte et sert tout d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont entre 0,080 mm et 4 mm.

- Eau : remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

- Adjuvants : sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé.

I.2.4 Types de mortier

Il est bon de savoir qu'il existe de multiples types de mortiers, plus ou moins adaptés en fonction des usages. On peut classer les mortiers selon leurs origines fabriquées en usine ou sur chantier. Voici les mortiers les plus fréquemment utilisés sur les chantiers.

I.2.4.1 Mortier-ciment

Le mortier-ciment est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau. Pour les jointements et les scellements, on peut envisager de se passer de sable. Ce matériau reste utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.), qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. Il possède comme avantage une excellente résistance à la compression. Il sèche également plus vite que la plupart des autres solutions.



FIGURE I.9 : MORTIER CIMENT.

I.2.4.2 Mortier-hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est un mortier résistant à l'eau, qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- Boucher des fissures,
- Enduire un mur,
- Réaliser des chapes.

On l'utilise avant tout dans les lieux humides (salle de bain, extérieur, etc.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches, comme un bassin de piscine.



FIGURE I.10 : MORTIER HYDROFUGE UTILISER EN DECORATION.

I.2.4.3 Mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux hautes températures. Selon les préparations, il peut généralement résister à des températures de 900 °C ou moins. En toute logique, il est uniquement utilisé pour les constructions qui sont exposées à ce type de températures, à savoir pour le montage et le jointement des :

- Foyers de cheminée,
- Des barbecues maçonnés.

Ce matériau protège ainsi les joints et la structure des constructions exposées aux flammes et à la chaleur.



FIGURE I.11 : MORTIER REFRACTAIRE.

I.2.4.4 Mortier de chaux

La chaux est l'un des liants les plus utilisés dans les anciennes constructions. A tel point qu'on utilise encore fréquemment des mortiers à la chaux. Il faut noter que ce type de mortier permet au mur de mieux respirer et dispose également de capacités hydrofuges (idéales pour les pièces humides).



FIGURE I.12 : MORTIER A CHAUX.

On trouve deux types de chaux :

- **Chaux aérienne** : elle a l'avantage de durcir lentement, et uniquement au contact de l'air.



FIGURE I.13 : CHAUX AERIENNE.

- **Chaux hydraulique** : elle durcit au contact de l'eau, puis de l'air. L'usage de chaux dans un mortier permet généralement une application plus facile, grâce à un temps de séchage un peu plus long. Ces mortiers sont cependant plus complexes à doser que le ciment.



FIGURE I.14 : CHAUX HYDRAULIQUE.

I.2.4.5 Mortier-colle

Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un mortier adhésif, qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol. Ce matériau est utilisé pour coller des plaquettes de parement, des carrelages muraux ou au sol, ou encore des dalles. Selon le mortier-colle choisi, l'utilisation peut se faire en intérieur et/ou en extérieur.



FIGURE I.15 : MORTIER COLLE.

I.2.5 Classification des mortiers

I.2.5.1 Selon leur domaine d'utilisation

Généralement, les mortiers varient selon leur domaine d'application, on peut citer les catégories suivantes :

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Support pour les peintures murales.
- Mortier d'injection.
- Mortier pour les mosaïques.
- Mortier de réparation pour pierres.

I.2.5.2 Selon la composition

Les mortiers se partagent en différents types :

– **Mortier de ragréage** : Le mortier de ragréage est un mélange de sable 0/1, de ciment et d'eau. L'ajout d'adjuvants est recommandé, notamment l'hydrofuge pour les façades extérieures.

– **Mortier de montage** : Le mortier de montage se fabrique en mélangeant du sable, du ciment et de l'eau. Pour monter un mur et assembler des blocs de béton entre eux, c'est le mortier de montage qui est utilisé car il est d'une grande résistance et d'une prise rapide, Le sable à utiliser doit être plutôt fin : partir sur du 0/1 ou du 0/4.

– **Mortier bâtarde** : Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

– **Mortier d'imperméabilisation** : Les mortiers d'imperméabilisation sont utilisés dans le cadre de travaux situés dans des lieux humides comme la salle de bain, les abords de piscine,

etc. Ils ont une plus grande résistance à l'humidité. Ils sont aussi utilisés pour tous les travaux de cuvelage, fondation et bassins.

– **Mortier rapide** : Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

– **Mortier industriel** : Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins.

I.2.6 Classes des mortiers [22]

- **Classe 1** : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- **Classe 2** : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- **Classe 3** : Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- **Classe 4** : Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 5** : Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.

I.3 Rappels sur la chaux vive

I.3.1 Introduction

La chaux vive, également connue sous le nom d'oxyde de calcium (CaO), est un matériau essentiel et polyvalent qui a joué un rôle significatif dans de nombreuses industries et applications depuis des siècles. Ce composé chimique a été utilisé de manière variée, que ce soit dans la construction, l'agriculture, la métallurgie, la purification de l'eau, ou encore dans des domaines plus contemporains tels que la gestion environnementale. Sa capacité à réagir vigoureusement avec l'eau et à participer à des réactions chimiques diverses ont fait un sujet d'intérêt continu pour la recherche et le développement.

I.3.2 Définition

La chaux vive est un composé chimique minéral obtenu par calcination du calcaire, qui est principalement constitué de carbonate de calcium (CaCO_3). La calcination implique le chauffage du calcaire à des températures élevées (environ 900 à 1000 °C) dans un four spécial appelé four à chaux. Ce processus entraîne la libération du dioxyde de carbone (CO_2) et la transformation du carbonate de calcium en oxyde de calcium.

La chaux vive est largement utilisée dans divers domaines, tels que l'industrie du bâtiment, l'agriculture, la purification de l'eau, la métallurgie, la production de verre, etc. Ses propriétés chimiques et physiques en font un matériau polyvalent et important. Elle est notamment utilisée pour fabriquer de la chaux éteinte (hydroxyde de calcium) en la mélangeant avec de l'eau, produisant ainsi de la chaleur et formant une pâte épaisse [23].

I.3.3 Caractéristique de la chaux vive

I.3.3.1 Réactivité chimique

La chaux vive est hautement réactive avec l'eau, produisant une réaction exothermique qui conduit à la formation d'hydroxyde de calcium (chaux éteinte). Cette réaction est utilisée dans divers domaines industriels et environnementaux.

I.3.3.2 Stabilité thermique :

La chaux vive est stable à des températures élevées, ce qui en fait un matériau précieux pour divers processus industriels, tels que la métallurgie.

I.3.3.3 Pouvoir alcalin

La chaux vive a un pouvoir alcalin élevé en raison de sa réaction avec l'eau pour former de la chaux éteinte. Cela la rend utile dans la neutralisation des acides et dans le traitement des eaux.

I.3.3.4 Absorption de dioxyde de carbone

La chaux vive a la capacité d'absorber le dioxyde de carbone de l'air au fil du temps, revenant ainsi partiellement à sa forme de carbonate de calcium originale (calcaire).

I.3.4 Utilisation dans la construction

La chaux vive a été historiquement utilisée dans la fabrication de mortiers et d'enduits, en combinaison avec d'autres matériaux tels que le sable et l'eau. Son utilisation permet d'améliorer les propriétés d'adhérence et de durabilité des matériaux de construction.

I.3.4.1 Utilisation agricole

La chaux vive est utilisée en agriculture pour amender les sols acides, en ajustant leur pH et en fournissant des nutriments essentiels aux plantes.

I.3.4.2 Séquestration du carbone

La chaux vive est étudiée pour son potentiel de captage du CO_2 atmosphérique à travers le processus de carbonatation minérale artificielle [23].

I.3.5 Composition de la chaux vive

La chaux vive joue un rôle important dans la fabrication de mortiers, qui sont utilisés dans la construction pour lier des éléments de maçonnerie tels que les briques ou les pierres. La chaux vive est souvent utilisée comme composant dans la préparation des mortiers à base de chaux. Elle réagit avec l'eau pour former de l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte), qui est ensuite mélangé avec d'autres matériaux pour créer un mortier de qualité.

Voici comment la chaux vive est liée aux mortiers et à leur préparation :

a. Réaction avec l'eau

Lorsque la chaux vive (CaO) entre en contact avec l'eau (H_2O), elle subit une réaction exothermique pour former de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), également appelé chaux éteinte. Cette réaction libère de la chaleur et provoque une augmentation du volume du matériau.

b. Hydratation dans le mortier

La chaux vive hydratée (chaux éteinte) est mélangée avec d'autres composants du mortier, tels que le sable et l'eau, pour former un mélange homogène. Cette réaction d'hydratation est essentielle pour le durcissement du mortier.

c. Amélioration des propriétés du mortier

La chaux vive hydratée apporte des propriétés bénéfiques au mortier, notamment une meilleure adhérence, une plus grande flexibilité et une capacité à s'auto-cicatriser grâce à l'absorption de dioxyde de carbone atmosphérique.

d. Réduction de la fissuration

L'ajout de chaux vive dans les mortiers contribue à réduire les risques de fissuration, car elle permet une meilleure distribution de la contrainte dans le matériau [24].

I.4 Conclusion

La réaction d'hydratation du ciment est le résultat de réactions chimiques entre les éléments prédominants du clinker, ainsi que potentiellement de celles de ses constituants secondaires. Toutefois, cette réaction se complexifie du fait des interactions chimiques et thermiques qui surgissent au cours du processus d'hydratation. De plus, les impuretés présentes dans la matrice solide exercent une influence significative sur l'hydratation de chaque composante.

Les mortiers restent un élément clé de la construction moderne, contribuant à la solidité et à la durabilité des structures tout en offrant des possibilités d'innovation continues pour répondre aux exigences changeantes de l'industrie de la construction.

La chaux vive demeure un matériau intemporel qui continue d'apporter des avantages dans divers domaines, tout en évoluant afin de répondre aux défis contemporains de durabilité et d'environnement. Son importance historique et sa pertinence actuelle en font un sujet d'étude précieux et une ressource précieuse dans l'industrie de la construction et au-delà.

Chapitre II

Matériel et Méthodes

II.1 Introduction

Dans le but de mettre en évidence l'influence de la chaux vive sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers confectionnés à base de Ciment Portland Artificiel (CPA), des essais physiques, chimiques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de contrôle de qualité de Sour El Ghoulane.
- Laboratoire CETIM du centre de recherche de Boumerdès.

Remarque : La plupart des essais de caractérisation des matériaux ont été réalisés conformément aux normes AFNOR R au sein du laboratoire de GICA Sour El Ghoulane sous des conditions climatiques $T = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR = 50 \%$.

II.2 Ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment Portland artificiel C.P.A – CEMI 42.5-ES provenant de la cimenterie de Sour El Ghoulane (GICA).

II.2.1 Caractéristiques physiques des pâtes de ciment

Les essais de caractérisation physique des différentes combinaisons sélectionnées pour la durabilité permettent de mesurer quelques caractéristiques importantes des pâtes de ciment à savoir :

- Consistance normale (selon les Normes : NF. EN. 196-3 et NF. P15 358) [25, 26].
- Début et fin de prise (Norme : NF. EN. 196-3) [25].

L'essai de consistance permet de déterminer le pourcentage d'eau requis pour la fabrication d'une pâte de ciment de consistance normale. La pâte est dite de consistance normale lorsque la sonde de 10 mm de diamètre de l'appareil de Vicat s'enfonce à une profondeur de $10 \pm 1 \text{ mm}$ en 30 secondes sous l'effet d'une charge totale de 300 g, la teneur en eau est exprimée en pourcentage de masse de ciment.

II.2.2 Essai de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicatronic sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P15-473 [27].



FIGURE II.1 : ESSAI DE PRISE VICATORNIC.

II.2.3 Compositions physique et minéralogique du ciment portland artificielle (CPA)

Les essais de composition du ciment ont été effectués au niveau du laboratoire de département de chimie de la cimenterie de Sour El-Ghozlane. Le calcul de la composition minéralogique est principalement basé sur les équations de Bogue :

$$C_3S = 4,07(CaO) - 7,6(SiO_2) - 6,718(Al_2O_3) - 1,43(Fe_2O_3) - 2,852(SO_3) \quad (II.1)$$

$$C_2S = 2,867(SiO_2) - 0,754 C_3S \quad (II.2)$$

$$C_3A = 2,65(Al_2O_3) - 1,629(Fe_2O_3) \quad (II.3)$$

$$C_4AF = 3,04(Fe_2O_3) \quad (II.4)$$

II.3 Sable

Dans cette expérience, un sable normalisé, répondant aux normes CEM, EN 196-1 et ISO 679 : 2009 a été utilisé [28]. Un sable normalisé est un sable naturel, principalement composé de silice, notamment dans ses fractions les plus fines. Il présente des caractéristiques de propreté, avec des grains généralement isométriques et arrondis. Il est conditionné dans des sachets en polyéthylène, chaque sachet pesant 1350 g.

II.4 Chaux vive

II.4.1 Essais réalisés sur la matière première

a. Essais physiques

Le concassage du calcaire est réalisé suivant les modalités de la méthodologie de l'évaluation des matières premières pour la fabrication de la chaux.

La cuisson est réalisée suivant les modalités de la méthodologie de l'évaluation des matières premières pour la fabrication des chaux vives.

b. Essais chimiques

L'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme EN 196-2 [29].

La détermination de la perte au feu est réalisée sur calcaires selon les modalités de la norme EN 196-2 [29].

II.4.2 Essais réalisés sur le produit fini

a. Essais physique

La détermination de $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2$ des chaux sont réalisées selon les modalités de la norme NF P18 508 [30].

La détermination du rendement, de la réactivité de la chaux et de la masse volumique apparente est réalisée selon les modalités la norme NF EN 459-2 [31].

La détermination de la teneur en eau libre est réalisée selon les modalités de la norme NF EN 459-2 [31] et suivant les exigences de la norme NF EN 459-1 [32].

La détermination de la répartition granulaire par tamisage est réalisée selon les modalités de la norme NF EN 459-2 et suivant les exigences de la norme NF EN 459-1.

b. Essais chimiques

La détermination de l'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme EN 196-2 [29].

La détermination de la perte au feu est réalisée sur chaux selon les modalités de la norme EN 196-2 sur la base des résultats chimiques.

II.4.3 Optimisation de cuisson des calcaires

L'optimisation du calcaire reçu a porté sur :

- Réception de la matière première (concassage de 5 à 16 mm).
- Cuisson des calcaires : la cuisson a été réalisée selon les paramètres cités dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU II.1 : OPTIMISATION DE CUISSON DES CALCAIRES.

Désignations	Paramètres		
Code d'échantillon	CH1	CH2	CH3
Température de cuisson (°C)	900 °C	1000 °C	1100 °C
Temps de cuisson (min)	105	120	120
Temps de refroidissement (min)	240		

Notation :

- ✓ La formule CH1 désigne la chaux produite à partir du calcaire à une température de cuisson de 900 °C.
- ✓ La formule CH2 désigne la chaux produite à partir du calcaire à une température de cuisson de 1000 °C.
- ✓ La formule CH3 désigne la chaux produite à partir du calcaire à une température de cuisson de 1100 °C.

II.5 Formulation des mortiers

II.5.1 Constituants

- Chaux vive,
- Ciment sans ajout,
- Sable normalisé,

- Eau distillée.



FIGURE II.2 : CHAUX VIVE.

II.5.2 Mode opératoire

Pour la confection, nous avons utilisé un mortier normal dont la composition est la suivante :

- 450 g d'un ciment CPA, l'ajout est introduit en substitution de ciment (pour 5 %, 10 %, 15 % et 20 %),
- 1350 g de sable normalisé.

Les constituants de mortier ont été pesés à l'aide d'une balance analytique.



FIGURE II.3 : PESER DE LA CHAUX VIVE.



FIGURE II.4 : PESER DU CIMENT CPA.

Dans le malaxeur automatique, les constituants pesés ont été introduits comme suit :

- Ciment + chaux vive à différents pourcentages (5 %, 10 %, 15 % et 20 %) (préalablement concasser et broyer) + eau.



FIGURE II.5 : MALAXEUR.

- Après 30 secondes de malaxage à petite vitesse, on introduit régulièrement un sac de sable normalisé.
- Passer le malaxage à grande vitesse pour les 30 secondes suivantes.
- Arrêter le malaxeur pendant 90 secondes, faire descendre au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois du bol et le placer au centre.
- Reprendre le malaxage à grande vitesse pour les 60 secondes à venir. Nous avons élaboré une série de moules à différents pourcentage (5 %, 10 %, 15 % et 20 %) ainsi qu'un témoin.
- Fixer le moule à trois éprouvettes avec la hausse sur l'appareil à chocs (le module doit être légèrement l'huilé avec une huile inerte vis-à-vis le ciment).
- Mouler immédiatement les éprouvettes en faisant une première couche étalée uniformément avec la grande spatule, puis serrer par 60 chocs avec l'appareil de choc.
- Introduire la seconde couche étalée uniformément avec la petite spatule (la seconde couche doit assurer un surplus) et la serrer une deuxième fois par 60 chocs.

- Retirer le moule de l'appareil à choc et commencer à éliminer le surplus du mortier à l'aide d'une règle.



FIGURE II.6 : APPAREIL QUI FIXE LE MORTIER.

- Démouler l'éprouvette en prenant soin de ne pas détruire les éprouvettes.



FIGURE II.7 : LE MOULE DU MORTIER.

- Peser chaque éprouvette, les identifier puis les immerger dans l'eau en les séparant les unes des autres.
- On retire les éprouvettes atteignant l'âge de résistance pour les timings suivants.



FIGURE II.8 : CONSERVATION DU MORTIER.

II.5.3 Essais Mécaniques

a. Confection des éprouvettes : On a utilisé des éprouvettes pour les essais de flexion et compression. Les mortiers normalisés ont été préparés selon les combinaisons suivantes :

TABLEAU II.2 : LES DIFFERENTS MORTIERS A CONFECTIONNER.

Notation	Ciment (%)	Chaux vive (%)	Ciment (g)	Chaux vive (g)
CPA	100	00	450	00
CPA + chaux vive 5 %	95	5	427,5	22,5
CPA + chaux vive 10 %	90	10	405	45
CPA + chaux vive 15 %	85	15	382,5	67,5
CPA + chaux vive 20 %	80	20	360	90

b. Procédure d'essai : Les échantillons d'essais ont été façonnés conformément aux normes dans des moules et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc. Une fois arasés, les moules contenant les échantillons seront étiquetés pour pouvoir les identifier en les couvrant avec une plaque en verre afin d'éviter tout contact avec l'humidité et la conserver d'une façon horizontale dans la chambre humide. Le démoulage est effectué après une durée

de 24 h et les échantillons sont conservés au laboratoire dans une eau saturée en chaux jusqu'au jour de l'échéance.

En tenant compte que les essais mécaniques ont été effectués aux échéances de : 2 ,7 , 28 et 60 jours.

c. Résistance à la flexion : la flexion a été mesurée en plaçant l'éprouvette sur l'appareil ToniTRol au niveau des deux rouleaux en actionnant l'appareil une charge vertical. Une force est appliqué sur la prisme et augmente régulièrement jusqu'à la rupture de prisme. Les temps de conservation sont : 48 h, 7 jours, 28 jours et 2 mois.



FIGURE II.9 : APPAREIL DE MESURE DE LA RESISTANCE MECANIQUE DU MORTIER.

- **Résistance à la compression :** On effectue l'essai sur les deux moitiés du prisme cassé en plaçant chaque moitié au centre des plateaux de l'appareil de compression en actionnant

l'appareil, une charge est appliquée sur les faces latérales en augmentant régulièrement la vitesse jusqu'à la rupture du matériau.

II.7 Conclusion

Les essais physiques ainsi que les analyses chimiques et minéralogiques réalisés dans divers laboratoires fournissent une vue d'ensemble des principales propriétés des matériaux utilisés pour élaborer les mortiers qui seront examinés ultérieurement du point de vue de leur comportement mécanique et de leur durabilité. La compréhension de ces caractéristiques joue un rôle essentiel dans l'interprétation des résultats des essais expérimentaux.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les principaux résultats des divers essais réalisés sur les mortiers préparés conformément aux différents pourcentage de chaux vive (5 %, 10 %, 15 % et 20 %). Ces résultats concernent les performances mécaniques en termes de résistance à la compression et à la flexion à différents temps de conservation (2, 7, 28, et 60 jours).

III.2 Analyse chimique et minéralogique

Une étape importante dans la caractérisation d'un matériau consiste à déterminer sa composition chimique et minéralogique. L'analyse chimique élémentaire indique la teneur en éléments chimiques. Concernant l'analyse minéralogique, une technique courante telle que la Diffraction des Rayons X permet d'identifier les phases cristallines ainsi que de caractériser l'arrangement du réseau cristallin.

III.2.1 Composition chimique et minéralogique du Ciment Portland Artificielle

Les tableaux III.1 et III.2 représentent, respectivement, la composition chimique et minéralogique du Ciment Portland Artificielle (noté CPA).

TABLEAU III.1 : COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT CPA.

Elément chimique	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Teneurs (%)	21,48	4,75	4,9	62,14	1,25	2,02

K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	PAF	CaOL	INS
0,32	0,13	0,02	0,98	0,94	1,16

TABLEAU III.2 : COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DU CIMENT CPA.

Code échantillon	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Ciment CPA	40,99	30,9051	4,2967	14,896

Les caractéristiques chimiques, qui sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives, concernant la teneur en anhydride sulfurique (SO_3) < 3,5 %, en magnésie (MgO) < 5 % et en ions chlore < 0,05 % [33].

III.2.2 Composition chimique et minéralogique du calcaire

La composition chimique et minéralogique du calcaire est représentée ci-dessous (tableau III.3).

TABEAU III.3 : COMPOSITION CHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE DU CALCAIRE.

Composition chimique											
Teneurs (%)											
SiO_2	Al_2O	Fe_2O	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2	P_2O_5	TiO_2	PF	Cl^-
1,50	0,27	0,16	54,45	0,28	0,13	0,03	0,08	0,02	0,03	43,06	0,004
Composition minéralogique											
CaCO_3 (%)				MgCO_3 (%)				Impuretés argileuses (%)			
97,23				0,59				2,22			

Nous constatons que le calcaire est principalement composé de la calcite ou carbonate de calcium (CaCO_3), de la magnésite (MgCO_3), et de petites quantités d'autres composants, telles que : les matières organiques, des silicates, des phosphates, des sulfates, des oxydes et autres.

III.3 Résultats des essais physico-chimiques de la chaux obtenue

Le tableau III.4 explique les résultats physico-chimiques de la chaux obtenue à différentes températures de calcination (900, 1000 et 1100 °C).

TABLEAU III.4 : RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUE DE LA CHAUX OBTENUE.

Paramètres		Résultats		
		Chaux à 900 °C	Chaux à 1000 °C	Chaux à 1100 °C
(CaO+ MgO) (%)		67,26	96,34	97,07
MgO (%)		0,40	0,47	0,48
CO ₂ (%)		30,0	1,33	0,00
Température d'extinction (°C)		35,4	82,37	88,97
Temps d'extinction (min)		6	8	6
Masse Volumique (Kg /dm ³)		1,30	1,10	1,00
Eau libre (%)		0	0	0
Répartition granulaire (Refus cumulés %)	5 mm	--	0	0
	2 mm	--	0	0
	0,2 mm	--	55,8	54,4
	0,09 mm	--	69,4	70,4

Nous remarquons qu'à la température de calcination de 1100 °C, la chaux a une teneur en CO₂ de 0,00 % ; ce qui explique que cette chaux est de qualité car la CaO a réagi avec le CO₂ pour donner du carbonate de calcium, selon la réaction ci-dessous, ce qui renforce sa structure.



III.4 Résultats des essais chimiques des chaux obtenues

Le tableau III.5 met en lumière les essais chimiques des chaux obtenues.

TABLEAU III.5 : RESULTATS DES ESSAIES CHIMIQUES DES CHAUX OBTENUES.

Code d'échantillon	Teneurs (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
CH1	1,94	0,52	0,32	66,8	0,40	0,36	0,06	0,10	0,02	0,05	29,38
CH2	1,41	0,36	0,32	95,8	0,47	0,25	0,04	0,12	0,02	0,05	1,09
CH3	1,40	0,35	0,30	96,5	0,48	0,25	0,06	0,12	0,02	0,05	0,38

Les propriétés chimiques jouent un rôle crucial dans la résistance des bétons face à des environnements corrosifs. Cela implique une concentration en anhydride sulfurique (SO₃) inférieure à 3,5 %, en magnésie (MgO) inférieure à 5 %, et en ions chlore inférieure à 0,05 % [33].

III.5 Interprétations

L'étude d'optimisation des chaux à partir du calcaire, calciné à différentes températures, donne les résultats représentés dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU III.6 : INTERPRETATION DES RESULTATS.

Code d'échantillon	Température (°C)	Conclusion
CH1	900	- La chaux obtenue n'est pas de qualité.
CH2	1000	- Cette chaux est de qualité CL 90-Q (R₅, P₄) .
CH3	1100	- Cette chaux est de très bonne qualité CL 90-Q (R₅, P₄) .

Indications

- ✓ **CL 90** : chaux calcique avec une teneur en CaO+MgO supérieure à 90 %.
- ✓ **CL 70** : chaux calcique avec une teneur en CaO+MgO supérieure à 70 %.

✓ **Q** : Chaux vive. **R₂** : $t_{40} < 25$: La température d'extinction qui dépasse 40 °C en moins de vingt-cinq minutes.

✓ **R₅** : $t_{60} < 10$: La température d'extinction qui dépasse 60 °C en moins de 10 minutes.

✓ **P₄** : Répartition granulaire.

Dans la suite de ce travail, nous nous sommes contenté de présenter l'essentiels des résultats obtenus avec la chaux vive calciné à la température de 1100 °C.

III.6 Analyse chimique des différents constituants préparés

Le tableau III.7 représente l'analyse chimique à différents pourcentages des constituants préparés.

TABLEAU III.7 : ANALYSE CHIMIQUE DES DIFFERENTS CONSTITUANTS PREPARES.

Echantillon	Teneurs (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
Ciment à 5 %	19,56	5,13	3,19	64,4	2,44	2,60	0,93	0,13	0,14	0,20	1,26
Ciment à 10 %	18,55	4,88	3,10	65,8	2,36	2,48	0,89	0,10	0,17	0,19	1,29
Ciment à 15 %	17,53	4,60	2,94	67,7	2,25	2,32	0,84	0,10	0,12	0,18	1,39
Ciment à 20 %	16,87	4,47	2,87	68,5	2,19	2,30	0,82	0,11	0,12	0,18	1,5

Les caractéristiques chimiques, qui sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives, concernant la teneur en anhydride sulfurique (SO₃) < 3,5 %, en magnésie (MgO) < 5 % et en ions chlore < 0,05 % [33].

III.7 Résultats de compression et flexions

III.7.1 Ciment Portland Artificielle (CPA)

Le tableau III.8 met en lumière les résultats de compression et de flexion du CPA après deux mois de conservation.

TABEAU III.8 : RESULTATS DE COMPRESSION ET FLEXIONS DU CPA.

Numéro d'échantillon	Tests de flexion (N/mm ²)	Tests de compression (N/mm ²)		
		Essai 1	Essai 2	Moy.
Echantillon 1	7,52	58,10	65	61,55
Echantillon 2	7,61	56,9	58,30	57,6
Echantillon 3	7,27	56,5	56,70	56,6

III.7.2 Mortier à 5 %

La figure III.1 représente les résultats de flexion du mortier contenant 5 % de chaux vive à différents temps de conservation.

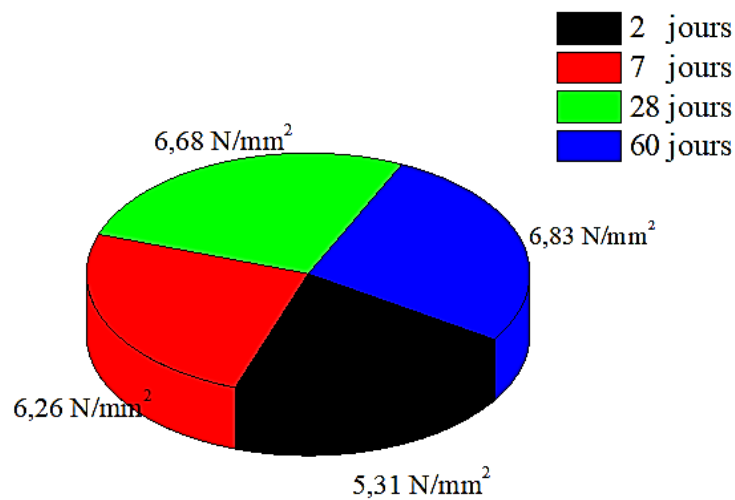


FIGURE III.1 : RESULTATS DE FLEXION DU MORTIER A 5 % A DIFFERENTS TEMPS DE CONSERVATION.

La figure III.2 représente les résultats de compression du mortier contenant 5 % de chaux vive à différents temps de conservation.

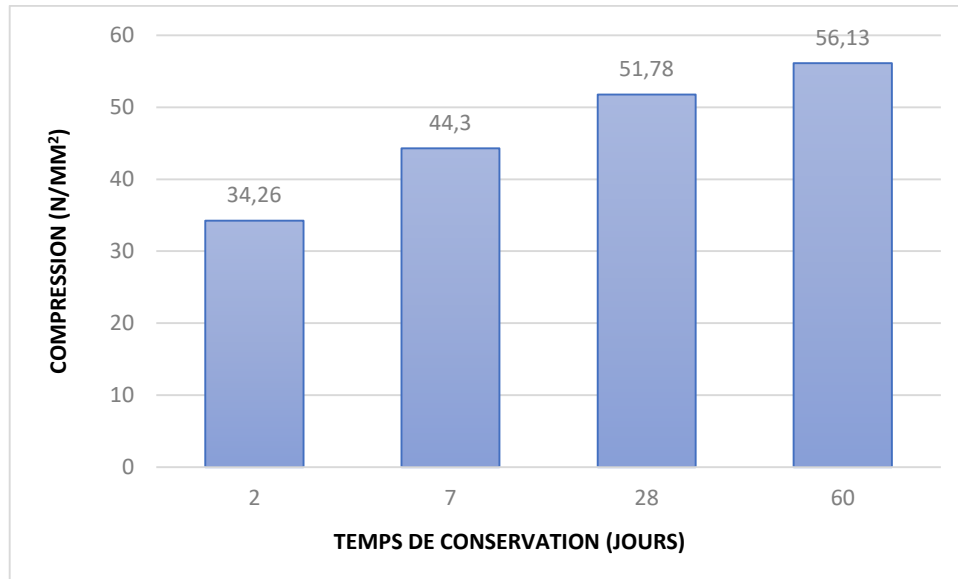


FIGURE III.2 : RESULTATS DE COMPRESSION DE MORTIER A 5 %.

III.7.3 Mortier à 10 %

Les résultats de compression et de flexion à différents temps de conservation d'un mortier contenant 10 % de chaux vive sont représenté sur les figures III.3 et III.4 respectivement.

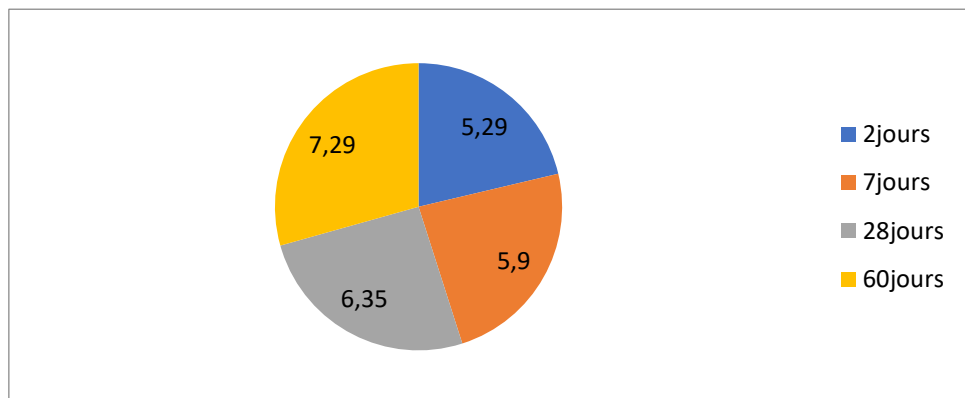


FIGURE III.3 : RESULTATS DE FLEXION (EN N/MM²) DU MORTIER A 10 % A DIFFERENTS TEMPS DE CONSERVATION.

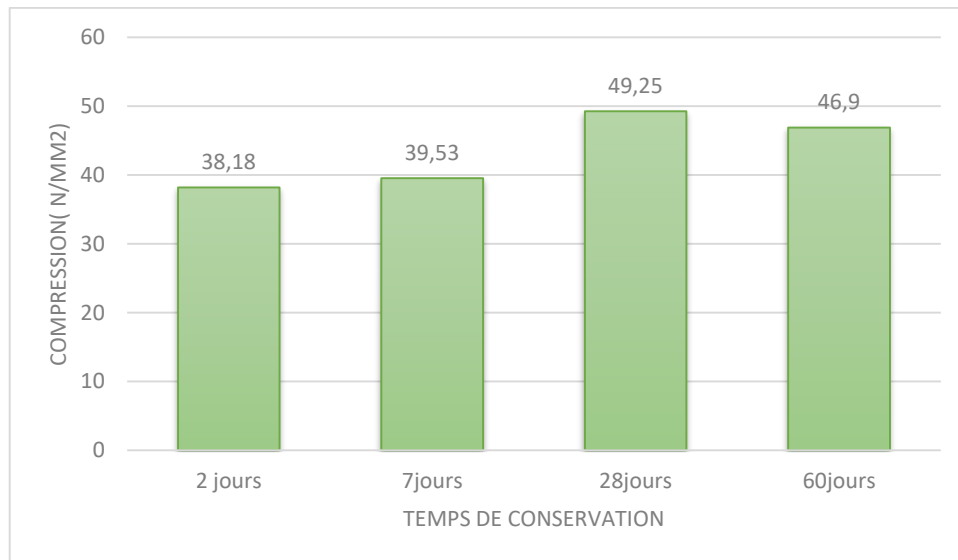


FIGURE III.4 : RESULTATS DE COMPRESSION DU MORTIER A 10 %.

III.7.4 Mortier à 15 %

La figure III.5 représente les résultats de flexion du mortier contenant 15 % de chaux vive à différents temps de conservation.

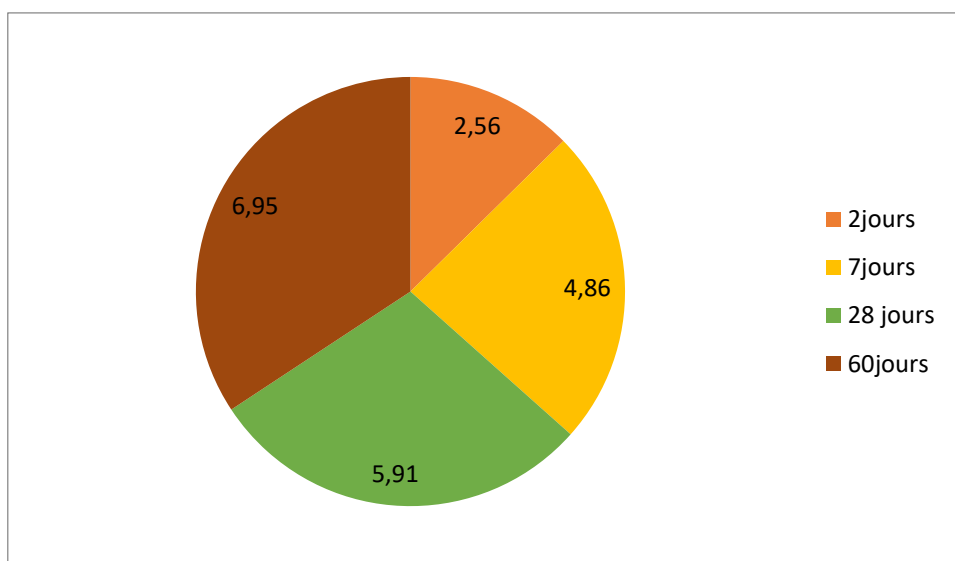


FIGURE III.5 : RESULTATS DE FLEXION (EN N/MM²) DU MORTIER A 15 % A DIFFERENTS TEMPS DE CONSERVATION.

Les résultats de compression du mortier contenant 15 % de chaux vive à différents temps de conservation sont représenté sur la figure III.6.

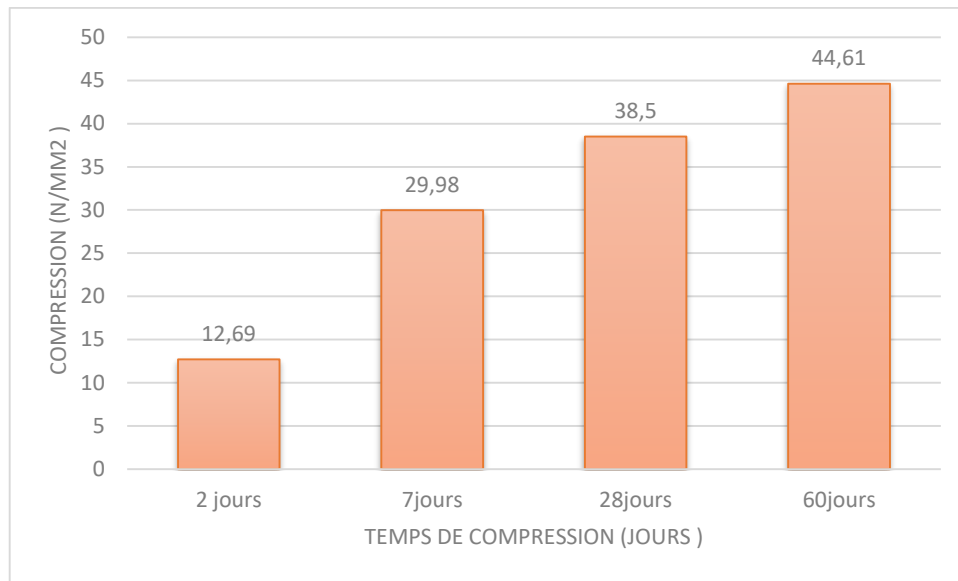


FIGURE III.6 : RESULTATS DE COMPRESSION DE MORTIER A 15%.

III.7.5 Mortier à 20 %

Les résultats de compression et de flexion à différents temps de conservation d'un mortier contenant 20 % de chaux vive sont représenté sur les figures III.7 et III.8 respectivement.

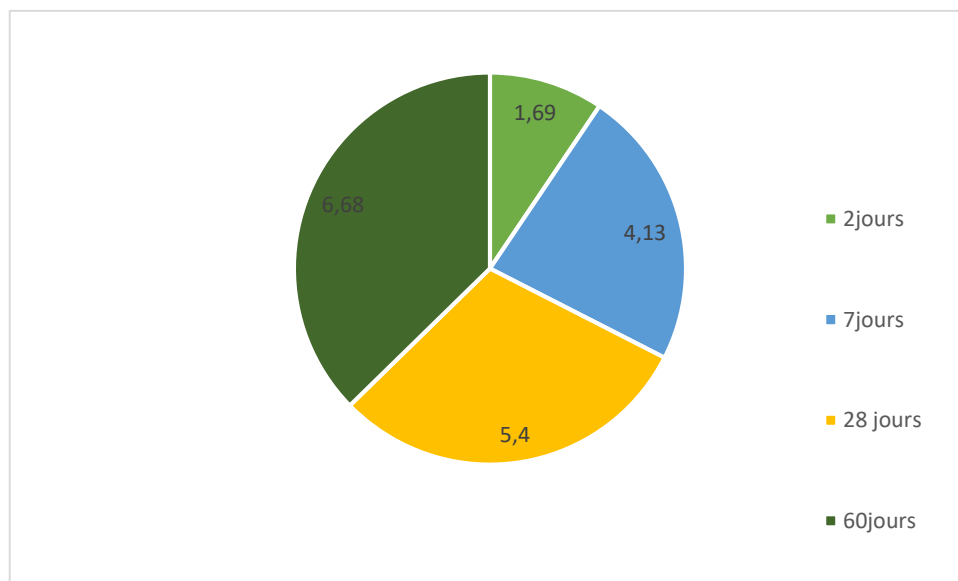


FIGURE III.7 : RESULTATS DE FLEXION (EN N/MM²) DU MORTIER A 20 % DE LA CHAUX VIVE EN FONCTION DU TEMPS DE CONSERVATION.

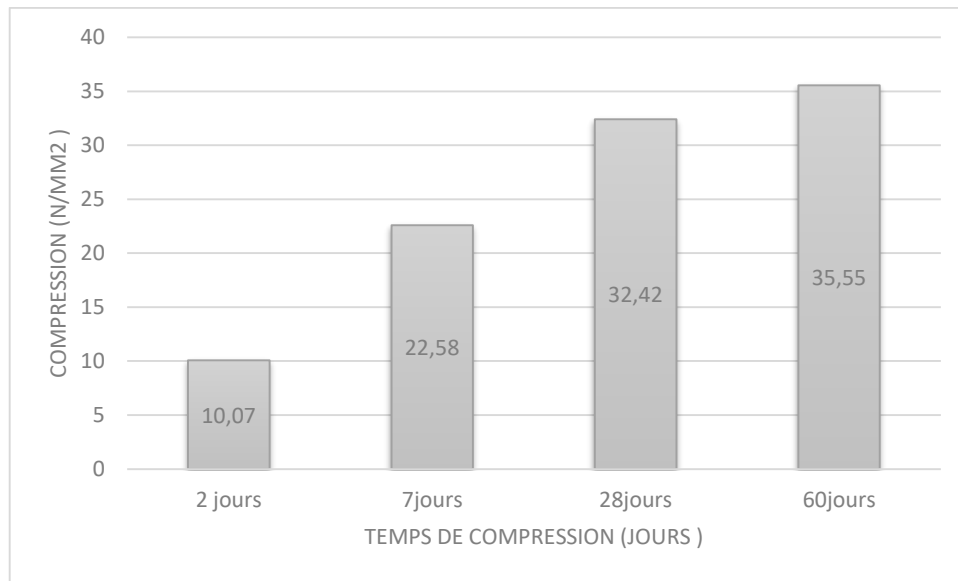


FIGURE III.8 : RESULTATS DE COMPRESSION DE MORTIER A 20 %.

III.8 Interprétation des résultats de flexion et compression

a. Aux temps de conservation des mortiers de 2, 7 et 28 jours

Nous avons enregistré, de manière générale, une augmentation de la résistance à la compression du mortier avec l'augmentation du pourcentage de chaux vive jusqu'à 10 %, Cela s'explique par le fait que la chaux vive a la capacité de réagir chimiquement avec les composants du mortier, notamment les particules d'argile et de silice, formant ainsi des liaisons solides qui renforcent la structure globale, Par conséquent, les échantillons de mortier contenant une plus grande quantité de chaux vive (15 % et 20 %) ont tendance à présenter une résistance faible.

b. A deux mois de conservation du mortier

Au bout de deux mois de conservation du mortier et si nous comparons la chaux vive au ciment Portland, nous pouvons conclure que le résultat attendu dépendra des besoins spécifiques du projet ; si la résistance à la compression est la principale préoccupation, le CPA peut être préféré (car sa résistance est élevée) comme est illustré dans la figure III.9. Néanmoins, si la durabilité, la flexibilité et la réduction des fissures sont des priorités, la chaux vive peut-être une option plus appropriée.

Il est essentiel de noter qu'il existe un point optimal en terme de pourcentage de chaux vive, Au-delà de ce point, l'augmentation de la teneur en chaux vive peut entraîner des effets

négatifs, tels que la fragilité accrue ou la diminution de la maniabilité du mortier, Par conséquent, il est nécessaire de trouver un équilibre entre la recherche de la résistance améliorée et la préservation d'autres propriétés essentielles du mortier et d'après nos résultats, nous avons trouvé que le bon intervalle est entre [5 % -10 %] en chaux vive.

De plus, l'effet de la chaux vive sur la résistance à la compression peut varier en fonction de la formulation globale du mortier, des conditions de cure et de l'environnement dans lequel il est utilisé, Par conséquent, les résultats doivent être interprétés en tenant compte de ces facteurs contextuels pour une application optimale sur le terrain.

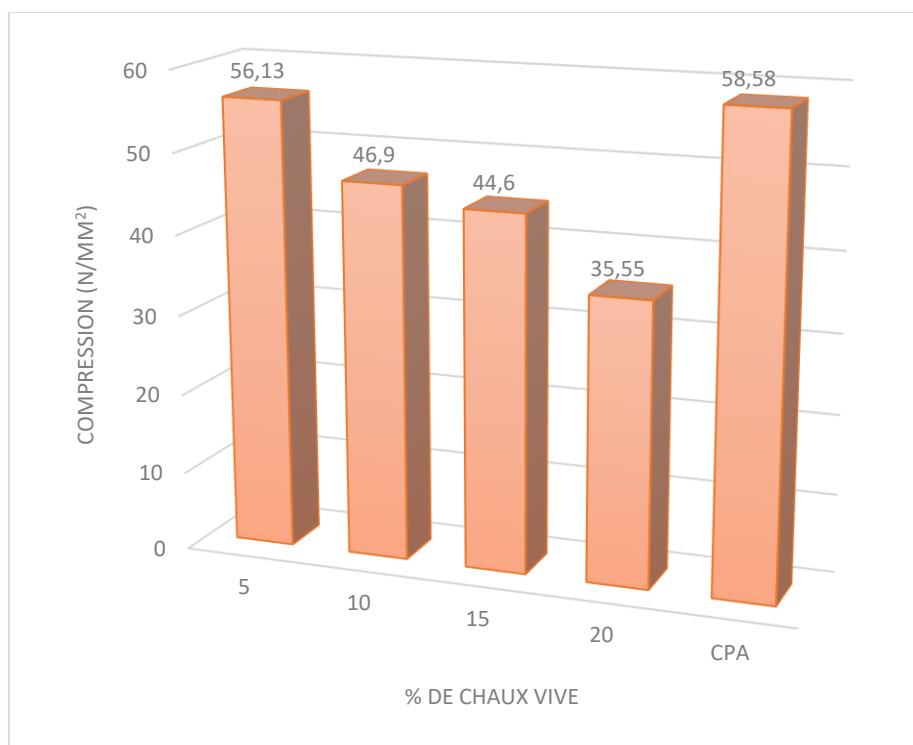


FIGURE III.9 : RESULTATS DE COMPRESSION EN FONCTION DE CHAUX VIVE ET CPA APRES 2 MOIS DE CONSERVATION.

III.9 Conclusion

En résumé, l'incorporation de la chaux vive dans le mortier a un impact significatif sur sa résistance à la compression. Cette augmentation de la résistance est un avantage potentiel, mais elle doit être soigneusement évaluée en fonction des besoins spécifiques du projet, en veillant à maintenir un juste équilibre entre résistance et autres caractéristiques du mortier,

En outre, l'interprétation des résultats de résistance à la compression doit être contextualisée en fonction des objectifs du projet et des propriétés désirées du matériau de construction, permettant ainsi de faire un choix éclairé entre la chaux vive et le ciment Portland ordinaire.

Conclusion Générale

Ce thème démontre la possibilité d'utiliser la chaux vive à grande échelle pour produire du ciment en Algérie, en exploitant les gisements de calcaire disponibles. La calcination à 1100 °C s'est révélée être une méthode efficace pour la production de ciments dans le pays, offrant des avantages techniques, économiques, environnementaux et de durabilité. L'approche de combiner différents pourcentages de chaux vive avec un ciment Portland artificiel gagne en intérêt dans la formulation de bétons et mortiers. Les résultats montrent que l'ajout de chaux vive peut influencer de manière significative sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier.

Selon les proportions utilisées, cela peut renforcer la résistance à la compression, la durabilité et l'adhérence du matériau, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour l'industrie de la construction. Il est crucial d'assurer la compatibilité entre la chaux vive et les autres composants du mortier, et d'adapter les proportions en fonction des besoins spécifiques de chaque projet.

En somme, cette recherche enrichit notre compréhension de l'utilisation de la chaux vive dans les mélanges de mortier et propose des recommandations pratiques pour son application efficace dans l'industrie de la construction, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances et des pratiques dans le domaine de l'ingénierie civile.

À la suite des conclusions précédemment exposées, nous souhaitons formuler plusieurs suggestions concernant les orientations futures de la recherche :

- Lors de ma recherche, il n'y a eu pas mal de recommandations et de propositions parmi les propositions c'est de bien conserver le mortier hors de l'eau (à l'air libre).
- De changer la méthode de préparation du mortier ; c'est-à-dire faire passer en premier le sable puis rajouter petit à petit le mélange chaux et CPA.
- De continuer l'expérience jusqu'à plusieurs pourcentages en chaux vive ainsi de comparer l'idée de cette recherche avec d'autres préparations telles que ciment commercialiser.

Références

Bibliographiques

- [1] Kabbab H., Chapitre I : Chimie du ciment, PDF, p2.
- [2] Venuat M., La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1, Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers, édition du Moniteur, Paris, France, 1989.
- [3] Djeha M., Bellabas M., Bilan massique et thermique, Mémoire d'ingénieur d'état en génie chimique, institut de chimie industrielle, USTHB, Algérie, 1990.
- [4] Braci M., Rapport de stage sur le procédé de fabrication de ciment, Génie des Procédés, ESSA – 09, 2021 - 2022.
- [5] Pliskin L., La fabrication du ciment, Edition Eyrolles, Paris, France, 1993.
- [6] Chanvillard G., Le matériau béton : connaissance générales, Les cours de l'ENTPE, Edition ENTPE ALEAS, 1999.
- [7] Kosmatka S. H., Kerkhoff B., Panaresse W. C., Macleond N. F., Mcgrath R. J., Dosage et contrôle des mélanges de béton, Bulletin d'ingénierie EB101, Association Canadienne du ciment, 7ème Edition Canadienne, 2004.
- [8] Bijen J., Benefits of slag and fly ash, Construction and building materials, 10 (1996) 309-314.
- [9] Baron J., Oliver J. P., La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 1992.
- [10] Feldman R. F., Significances of porosity measurements on blended cement performance, 1st international conference on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-production concrete, Montebello, V, m, Malhotra, Ed.; ACI, SP - 79,1, 1983.
- [11] Delgrave A., Etude des mécanismes de pénétration des ions chlore dans les bétons conventionnels et à haute performance, Thèse de Doctorat, université Laval, Québec, Canada, 1996.
- [12] Duchesne J., Le rôle des ajouts minéraux face aux réactions alcalis-granulats dans le béton : mécanismes de réaction, performance et essais d'évaluation de la performance, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 1993.

- [13] Macleod N. F., l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel, dégel et aux produits chimiques de déglacage, Cement Association Of Canada.
- [14] Neville A. M., Propriété des bétons, Edition Eyrolles, 2000.
- [15] Ashby M. F., Jones D. R. H, Matériaux 2, Edition Dunod, 1991.
- [16] Kara A. R., Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, Thèse de Doctorat, Université Cergy Pontoise, France, 2002.
- [17] Buil M., Olivier J. P., La durabilité des bétons, Collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Sous la direction de Jacques Baron et Jean Pierre Ollivier, Paris : Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, France, 1992.
- [18] Feldman R. F., Cheng-Hy H., Properties of Portland cement-silica fume pastes, 1, Porosity and surface properties, Cement and Concrete Research 5 (1985) 15.
- [19] Pokkuluri K., Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range, Mémoire de Master, Université de Virginie, Etats-Unis, 1998.
- [20] Older Y., Hydration, setting and hardening of Portland cement, dans Lea's - C Chemistry of Cement and Concrete, chap 6, Arnold, 4th éd, 1998.
- [21] Gané R., Cours de durabilité et Réparation des bétons, Chapitre 2, Université de Sherbrooke, Canada, 2002.
- [22] Boubekeur T., Polycopié de cours de matériaux de construction, 2017.
- [23] Schofield J., Pearce J., Lime in building a practical guide, edition English heritage, 2007.
- [24] Boynton R. S., Chemistry and technology of lime and limestone », edition willey, 1980.
- [25] « NF EN 196-3 septembre 2017, Norme En vigueur Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 ».
- [26] « Norme : NF, p15 358 ».

[27] « Norme : NF P15-473 ».

[28] « Norme : EN 196 -1 ».

[29] « Norme : EN 196-2 ».

[30] « Norme : NF P18 508 ».

[31] « Norme : NF-EN 459-2 ».

[32] « Norme : NF-EN 459-1 ».

[33] Ghomari Fouad, Science des matériaux de construction, Support du cours de Génie civile, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005 - 2006.

Résumé

Ce PFE traite le thème de l'influence de la chaux vive sur les propriétés d'un mortier qui vise à étudier les effets de l'incorporation de la chaux vive dans un mélange de mortier. Cette recherche se concentre sur l'analyse des propriétés physiques, mécaniques et chimiques du mortier modifié par la présence de la chaux vive.

L'étude commence par une revue théorique pour comprendre les antécédents et les précédentes recherches sur ce sujet. Ensuite, des expérimentations sont menées en laboratoire, comprenant la préparation de différents échantillons de mortier avec des proportions variables de chaux vive. Les échantillons sont soumis à des tests de résistance mécanique, d'adhérence, et d'autres caractéristiques pertinentes. Les résultats sont ensuite analysés pour déterminer comment la chaux vive affecte la performance du mortier.

Les implications pratiques de cette étude peuvent être vastes, notamment dans le domaine de la construction et de la rénovation. Comprendre comment la chaux vive peut améliorer ou altérer les propriétés du mortier afin d'aider les professionnels à prendre des décisions éclairées lors de la sélection des matériaux de construction. De plus, cela peut contribuer à des pratiques de construction plus durables en tirant parti des avantages de la chaux vive tout en minimisant les inconvénients.

En conclusion, ce PFE se penche sur l'influence de la chaux vive sur un mortier et offre des informations précieuses pour l'industrie de la construction. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à une utilisation plus efficace de la chaux vive dans les projets de construction, ce qui pourrait avoir un impact positif sur la durabilité et la qualité des structures,

Mots clés : ciment, chaux vive et mortier.

Abstract

This Final Year Project (FYP) focuses on the influence of quicklime on the properties of a mortar and aims to investigate the effects of incorporating quicklime into a mortar mix. This research centers on the analysis of the physical, mechanical, and chemical properties of mortar modified by the presence of quicklime.

The study commences with a theoretical review to understand the background and previous research on this subject. Subsequently, laboratory experiments are conducted, including the preparation of various mortar samples with varying proportions of quicklime. These samples undergo tests for mechanical strength, adhesion, and other relevant characteristics. The results are then analyzed to determine how quicklime affects the mortar's performance.

The practical implications of this study can be extensive, especially in the fields of construction and renovation. Understanding how quicklime can enhance or alter mortar properties can assist professionals in making informed decisions when selecting construction materials. Furthermore, it can contribute to more sustainable construction practices by leveraging the benefits of quicklime while minimizing drawbacks.

In conclusion, this FYP delves into the influence of quicklime on mortar and provides valuable insights for the construction industry. The findings from this study can contribute to a more efficient use of quicklime in construction projects, potentially positively impacting the sustainability and quality of structures.

Keywords: cement, quicklime and mortar.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد تأثير الجير الحي على الملاط عند زيادته بنسب مختلفة في خليط الملاط. يركز هذا البحث على تحليل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية للملاط المعدل بوجود الجير الحي. تبدأ الدراسة بمراجعة نظرية لفهم الخلفية والأبحاث السابقة حول هذا الموضوع. ثم يتم إجراء التجارب في المختبر، بزيادة نسب مختلفة للجير الحي لتحضيرات الملاط ثم يتم اختبار العينات للتأكد من الصلابة الميكانيكية لخصائص الأخرى ذات الصلة. يتم بعد ذلك تحليل النتائج لتحديد مدى تأثير الجير الحي على أداء الملاط. يمكن أن تكون الآثار العملية لهذه الدراسة واسعة النطاق، خاصة في مجال البناء والتجديد. إن فهم كيف يمكن للجير الحي أن يعزز أو يغير خصائص الملاط يمكن أن يساعد المهنيين على اتخاذ قرارات عند اختيار مواد البناء، بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يساهم في إنشاء بنايات أكثر استدامة من خلال الاستفادة من فوائد الجير الحي مع تقليل الجوانب السلبية. في الختام، تبحث هذه الدراسة تأثير الجير الحي على الملاط ويقدم معلومات قيمة لصناعة البناء والتشييد. يمكن أن تساهم نتائج هذه الدراسة في زيادة كفاءة استخدام الجير الحي في مشاريع البناء، مما قد يكون له تأثير إيجابي على متانة وجودة الهياكل.

الكلمات: الأسمنت والجير الحي والملاط.