



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option: **GÉNIE DES PROCÉDÉS DES MATÉRIAUX**

THÈME

**Effets des ajouts à base de calcaire sur les propriétés
mécaniques du ciment - cimenterie d'Oued Sly - Chlef**

Présenté par

ELAHACENE MERIEM

Soutenu le 26 /06 / 2024 devant le jury composé de :

Présidente :	ATTOUTI SALIMA	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	MEKIBES ZOHRA	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	CHOUAIIH ABDELKADER	Pr	Université de Mostaganem
Invitée :	MOSTEFA FOUZIA	MCB	Université de Mostaganem

Remerciements

Ce travail a été réalisé au niveau de la cimenterie Oued-Sly, wilaya de Chlef. J'adresse mes remerciements aux responsables de cette entreprise pour m'avoir donné l'occasion d'effectuer mes travaux de Master au sein de cette entreprise.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur CHOUAÏH Abdelkader pour m'avoir accueilli, m'encadré et pour son soutien et les judicieux conseils qu'il a apportés à ce travail.

Je tiens à remercier Dr. Attouti Salima, maître de conférences A à l'Université de Mostaganem, qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens à remercier Dr. Mekibes Zohra, maître de conférences B à l'Université de Mostaganem, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner et de participer au jury de ce travail.

Je remercie Monsieur Mohamed TAHAR, ingénieur à la cimenterie, pour son aide afin de m'accepter à la cimenterie et pour ses conseils tout au long de ce travail.

Enfin, J'exprime ma profonde gratitude aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.



Dédicace

À mes chers parents, Pour votre soutien inconditionnel, vos sacrifices, et votre amour sans faille, ce travail est dédié à vous. Papa et Maman, votre guidance et votre encouragement ont été mes phares tout au long de ce parcours.

À mes adorables sœurs, Wissem, Houda, Lina, et mon petit frère Abderahmane, vous avez toujours été là pour moi avec votre affection et vos encouragements. Votre présence à mes côtés a été une source inestimable de motivation et de joie.

À mes amis Anfel et Aya, pour votre amitié précieuse, votre soutien constant, et les moments de partage qui ont enrichi ma vie.

Merci à tous pour votre amour, votre soutien, et votre patience. Ce mémoire est le fruit de vos encouragements et de votre présence à mes côtés.



Elahacene Meriem

ملخص

تتعلق الدراسة التي أجريت خلال رسالة الماجستير هذه بتطوير الأسمنت البورتلاندي عن طريق تعديل تركيبه الكيميائي. الهدف من هذه الدراسة هو تحليل نتائج الأسمنت ذو الأساس الحجري من حيث مقاومته الميكانيكية وخصائصه الفيزيائية والكيميائية. سيؤدي ذلك إلى تسهيل اختيار الكمية الصحيحة التي يجب إضافتها لتحسين أداء الأسمنت. ستوفر نتائج هذا التحليل أيضًا فهمًا أفضل لتأثير الحجر الجيري على متانة وجودة الإنشاءات الأسمنتية. تم خلال هذا العمل استخدام الحجر الجيري وهو مادة وفيرة كإضافة لكلنكر البورتلاند بنسب مختلفة (10، 15، 20، 25%). وتشير النتائج إلى أن الأسمنت الذي يحتوي على كمية منخفضة من الحجر الجيري يلعب دورًا في تحسين القوة على المدى الطويل. وتشير هذه النتائج إلى أنه ينبغي النظر بعناية في كمية الحجر الجيري المضافة لتحقيق نتائج الأداء المتوقعة. ومن ناحية أخرى، أظهرت عينات الأسمنت التي تحتوي على نسب عالية من الحجر الجيري نتائج مثيرة للاهتمام للغاية من حيث القوة الميكانيكية عند 28 يومًا.

الكلمات المفتاحية: الكلنكر، إنتاج الأسمنت، الإضافات، الحجر الجيري، أوقات التثبيت، النعومة، المقاومة الميكانيكية.

Résumé

L'étude effectuée lors de ce travail de master concerne le développement du ciment portland par modification de sa composition chimique. L'objectif de cette étude est d'analyser les résultats des ciments à base de calcaire, en ce qui concerne leur résistance mécanique et leurs caractéristiques physico-chimiques. Cela facilitera le choix de la quantité adéquate à ajouter afin d'optimiser la performance du ciment. Les résultats de cette analyse permettront également de mieux comprendre l'impact du calcaire sur la durabilité et la qualité des constructions en ciment. Au cours de ce travail, le calcaire, matériau abondant, a été utilisé comme ajout au clinker portland avec différents pourcentages (10, 15, 20 et 25%). Les résultats indiquent que les ciments contenant une faible quantité de calcaire jouent un rôle dans l'amélioration de la résistance à long terme. Ces résultats suggèrent que la quantité de calcaire ajoutée doit être considérée attentivement pour atteindre les résultats de performance escomptés. D'un autre côté, les échantillons de ciment contenant des pourcentages élevés de calcaire ont montré des résultats très intéressants en termes de résistance mécanique à 28 jours.

Mots clés : Clinker, production du ciment, ajouts, calcaire, délais de prise, finesse, résistance mécanique.

Abstract

The study carried out during this master's thesis concerns the development of Portland cement by modification of its chemical composition. The aim of this study is to analyze the results of limestone cements, in terms of their mechanical strength and their physico-chemical characteristics. This will make it easier to choose the right amount to add in order to optimize the performance of the cement. The results of this analysis will also help to better understand the impact of limestone on the durability and quality of cement structures. During this work, limestone, abundant material, was used as an addition to the Portland clinker with different percentages (10, 15, 20 and 25%). The results indicate that cements containing a low amount of limestone (10% limes) play a role in improving long-term strength. These findings suggest that careful consideration should be given to the amount of limestone added to achieve the desired performance outcomes. On the other hand, cement samples containing high percentages of limestone showed very interesting results in terms of mechanical strength at 28 days.

Key words: Clinker, cement production, additions, limestone, setting times, fineness, mechanical resistance.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LE CIMENT	
I.1.Le ciment	4
I.1.1. Histoire et développement du ciment	4
I.1.2. Définition du ciment	5
I.1.3. Fabrication du ciment	5
I.1.3.1. Extraction	5
I.1.3.2. Concassage	6
I.1.3.3. Préparation du cru	6
I.1.3.4. Homogénéisation	7
I.1.3.5. Cuisson	7
I.1.3.6. Refroidissement	8
I.1.3.7. Broyage	8
I.1.3.8. Stockage, Ensachage et Expédition du ciment	9
I.1.4. Types de ciment et leur application	10
I.1.5. Propriétés physico-chimiques du ciment	13
I.1.5.1. Propriétés chimiques	13
I.1.5.2. Propriétés physique	16
I.1.6. Propriétés mécaniques du ciment.....	20
I.1.6.1. Résistance à la compression	20
I.1.6.2. Résistance à la flexion	20
I.1.6.3. Résistance à la traction	21
I.1.7. Facteurs influençant les propriétés du ciment	21
I.1.7.1. Composition chimique	21
I.1.7.2. Rapport eau/ciment	25
I.1.8. Présentation de la cimenterie d'oued Sly Chlef	26
CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES	
II. 1. Introduction	30
II.2. Description des matériaux utilisés	30
II.2.1 Type de ciment étudié	30
II.2.2. Additifs	31
II.2.2.1. Le calcaire	31
II.2.2.2. Le sable	32
II.2.2.3. L'eau	32
II.3. Méthodologie expérimentale	32
II.3.1. Préparation des échantillons de ciment	32
II.3.2. Analyse chimique et minéralogique des échantillons	32
II.3.2.1. Par fluorescence X (XRF)	32
II.3.2.1. Par Diffraction de rayon X (DRX)	34
II.3.3. Caractérisation des Échantillons	36
II.3.3.1. Caractérisation physique	36

II.3.3.2. Caractérisation mécanique	40
II.4. Conditions de l'expérimentation	46
II.4.1. Environnement de Laboratoire	46
II.4.2. Équipements	46
II.4.3. Préparation des Échantillons	46
II.4.4. Conditions Spécifiques pour les Essais	47
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION	
III.1. Résultats d'analyse chimique des échantillons	49
III .1.1. Par fluorescence X	49
III .1.2. Par la diffraction de RX	51
III .2. Résultats des essais physiques :	54
III .2.1 Surface spécifique Blaine SSB	54
III .2.2-Refus sur tamis de 45 µm	54
III .2.3-La consistance normale, temps de début et fin de prise et l'expansion à chaud.....	55
III .3. Résultats des essais mécaniques	57
III .3.1. Résistance à la flexion	57
III .3.2. Résistance à la compression	59
CONCLUSION GÉNÉRALE	62
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	64

Liste des figures

Figure I.1: Dumper.....	5
Figure I.2 : Bandes transporteuses	5
Figure I.3 : Concassage de la matière première	6
Figure I.4 : Broyage de la matière cru.....	6
Figure I.5 : Silo homogénéisation de la matière crue.....	7
Figure I.6 : Four rotatif à ciment ‘le cœur de la cimenterie	7
Figure I.7 : La ligne de cuisson (fabrication du clinker).....	8
Figure I.8 : Broyeur du clinker.....	9
Figure I.9: Schéma de production du ciment.	9
Figure I.10 : Micrographe en lumière réfléchie d’une section polie de clinker de ciment.	14
Figure I.11 : Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.....	17
Figure I.12 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.....	17
Figure I.13 : Aiguilles de Le Chatelier	19
Figure I.14 : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance	20
Figure I.15: Cimenterie d’OUED-SLY CHLEF	26
Figure I.16 : plan de la zone industrielle d’OUED-SLY.....	27
Figure II.17 : Pastilleuse.....	33
Figure II.18 : Analyseur XRF	33
Figure II.19 : Appareil de DRX	35
Figure II.20 : Perméabilimètre de Blaine	37
Figure II.21 : L’appareil Alpine	38
Figure II.22 : Appareil Vicat.....	39
Figure II.23 : Moule Vicat.....	39
Figure II.24 : Moule Le Chatelier	40
Figure II.25 : Bouilloire Le Chatelier.....	40
Figure II.26: Malaxeur.	41
Figure II.27 : Moule à alvéoles.	42
Figure II.28 : Table à chocs.....	42
Figure II.29 : Chambre humide	43
Figure II.30: Presse hydraulique de résistance.....	44
Figure II.31 : Essai de flexion.	45
Figure II.32 : Essai de compression.	46
Figure III.1 : diffractogramme RX de l’échantillon Ech_0.....	51
Figure III.2 : diffractogramme RX de l’échantillon Ech_1.....	52
Figure III.3: diffractogramme RX de l’échantillon Ech_2.....	52
Figure III.4: diffractogramme RX de l’échantillon Ech_3.....	53
Figure III.5: diffractogramme RX de l’échantillon Ech_4.....	53
Figure III-6. Evolution de consistance normale en fonction de pourcentage de calcaire	55
Figure III-7. Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de calcaire	56
Figure III-8. Variation de la résistance à la flexion des échantillons en fonction de pourcentage de calcaire	57
Figure III-9. Variation de la résistance à la compression des Mortiers en fonction de pourcentage de calcaire	59

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les différents types de ciment courants	11
Tableau I.2. Utilisation du ciment des ciments courants.....	12
Tableau I.3 : Composition chimique du clinker	13
Tableau I.4 : Composition moyenne d'un ciment portland artificiel	14
Tableau I.5 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe	21
Tableau II.1 : Composition chimique du ciment du clinker d'après la fabrication.	30
Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment d'après la fabrication.....	31
Tableau II.3. Caractéristique physico-mécanique du ciment utilisé.	31
Tableau II.4. Analyse chimique du calcaire.....	31
Tableau II.5. Les différents pourcentages de Ciment pour mesurer la consistance.....	38
Tableau III.1: Analyse chimique à différents pourcentages de calcaire par XRF.....	50
Tableau III.2: Phases minéralogiques du clinker	51
Tableau III.3: SSB des échantillons à différents pourcentages de calcaire.....	54
Tableau III.4: Refus des échantillons à différents pourcentages de calcaire	54
Tableau 2.3: Résultats de La consistance normale, temps de début et fin de prise et l'expansion à chaud des échantillons à différents pourcentages de calcaire.....	55
Tableau 3.1 : Résistance à la flexion des échantillons à différents pourcentages de calcaire..	57
Tableau 3.2 : Résistance à la compression à différents pourcentages de calcaire	59

LISTE DES NOTATIONS

C3S : Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$.

C2S : Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$.

C3A : Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$.

C4AF : Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$.

T : Les schistes calcinés.

D : les fumées de Silice.

H : H_2O .

C : CaO .

PAF : Perte au feu.

PZ : Pouzzolane naturelle.

RI : Résidus insolubles.

E/C : Le rapport (eau/ ciment).

Ri : Pourcentage des refus cumulés.

Ti : Pourcentage des tamisats cumulés.

SSB : Surface spécifique Blaine.

Mc : Masse des refus cumulés (g).

NA : Normes algériennes.

ΔM : Variation de la masse de l'éprouvette.

Introduction

Introduction Générale

Le ciment est un matériau essentiel dans le domaine de la construction, utilisé comme liant pour assembler des éléments de maçonnerie et produire du béton[1]. Son utilisation est omniprésente dans le secteur de la construction, en raison de ses propriétés physico-chimiques uniques. Ces propriétés peuvent être modifiées et améliorées par l'ajout d'adjuvants spécifiques, tels que des ajouts à base de calcaire. Ces ajouts peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés chimiques et physico- mécaniques du ciment, influençant ainsi sa résistance, sa durabilité et d'autres caractéristiques essentielles[14].

Le présent travail porte sur l'effet du calcaire pur utilisé comme ajout avec différents pourcentages sur les résistances mécaniques du ciment produit à la cimenterie d'Oued Sly – Chlef. Pour ce faire, une approche expérimentale a été adoptée, impliquant la réalisation de tests spécifiques pour évaluer les différentes propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment modifié. Ces tests ont été réalisés en conformité avec les normes en vigueur, afin d'assurer la fiabilité et la précision des résultats obtenus. L'ajout de calcaire dans le ciment est une pratique courante visant à améliorer certaines de ses propriétés mécaniques et environnementales.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux. Le premier chapitre comprend une présentation du Groupe GICA, une entreprise renommée dans la production de ciment, soulignant son engagement envers l'innovation et la qualité, ainsi qu'une vue d'ensemble des généralités

Sur le ciment.

Le deuxième chapitre détaille l'étude expérimentale menée pour évaluer les effets des ajouts à base de calcaire sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment. Ce chapitre décrit en détail la méthodologie adoptée, y compris les matériaux utilisés, les procédures de test et les équipements employés. Les résultats obtenus à partir de ces tests sont analysés et discutés en profondeur dans le troisième chapitre.

Introduction Générale

Le troisième chapitre présente les résultats de l'étude expérimentale, en mettant en évidence les effets des ajouts à base de calcaire sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment. Afin de déterminer les avantages et les limitations de l'utilisation des ajouts à base de calcaire. Cette analyse permettra de mieux comprendre l'impact de ces ajouts sur la performance globale du ciment, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications et à de nouvelles recherches dans ce domaine.

Enfin, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale inspirée des résultats obtenus.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LE CIMENT

I.1.Le ciment

I.1.1. Histoire et développement du ciment

Les ciments auraient en premier lieu été découverts par les Égyptiens puis perfectionnés par les civilisations suivantes, tels que les Mayas et les chinois, par l'utilisation de chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), usage repris et généralisé par les Romains. [1] Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, aucun progrès ne s'est fait. En 1756, afin de réparer le phare d'Eddystone de façon durable, l'ingénieur britannique John Smeaton entreprit des expériences avec des mortiers en eau douce et en eau salée, il découvrit ainsi que du ciment fait de pierre calcaire contenant une forte proportion d'argile durcissait sous l'eau. En 1817, le Français Louis Vicat, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, les chaux hydrauliques, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication, [2] il élabore la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches concernant la proportion d'argile et la température de cuisson. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née. [1]

L'Anglais Joseph Aspdin fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie. [2] En 1828, Louis Vicat réalise un pont suspendu en ciment, au-dessus de la Corrèze, à Argentat, qui démontre la qualité de son matériau, Dans les années qui suivent, Vicat parcourt la France afin de découvrir plus de trois cents carrières capables de fournir ces chaux hydrauliques et il publie les listes dans les Annales des Ponts et Chaussées. Mais il faut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits actuellement ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé.

En France, un polytechnicien, Pavin de Lafarge, installe des fours à chaux au Teil, en 1833, la première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1848 à Boulogne-surMer. La production industrielle de ciment débute alors dans la première moitié du XIX^{ème} siècle. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets en particulier. Le premier composant du béton est donc opérationnel à la fin de la première moitié du XIX^{ème} siècle.

Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes [1].

I.1.2. Définition du ciment

Le terme ciment est issu du latin *coementum* qui signifie mortier. Est une poudre minérale, obtenue par un processus de fabrication très précis, mélange de l'eau, cette poudre forme une pâte qui se fige et durcit même sous l'eau [3]. Elle est obtenue par broyage et cuisson à 1 450°C, d'un mélange de calcaire et d'argile. Appelé clinker, ce matériau granulaire est pour l'essentiel une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer [4]. Les granules de clinker, d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm, sont finement broyées avec addition de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ de 3 à 5 % en masse) dont le rôle est de réguler la prise.

I.1.3. Fabrication du ciment

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

I.1.3.1. Extraction

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre à roche à l'explosif. Dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite des transporteurs pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues pelles avant d'être transportée Elle est acheminée par des dumpers ou des bandes transporteuses vers l'atelier de concassage [5].



Figure I.1: Dumper



Figure I.2 : Bandes transporteuses

I.1.3.2. Concassage

Les matériaux sont extraits des carrières présentant des granulométries grossières. Le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100mm au maximum [5].

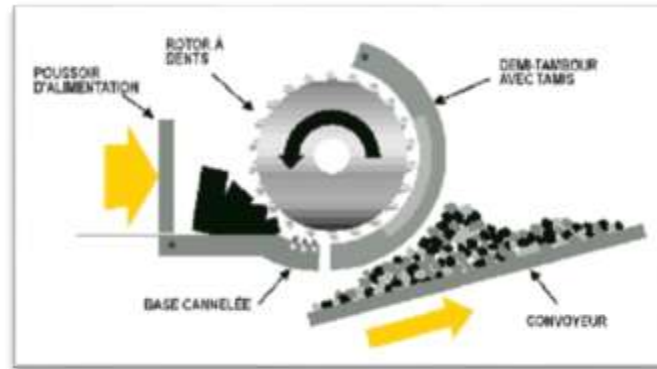


Figure I.3 : Concassage de la matière première

I.1.3.3. Préparation du cru

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, contiennent 80% de calcaire pour 20 % d'argile, peut se faire suivant différents procédés, le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs [6].

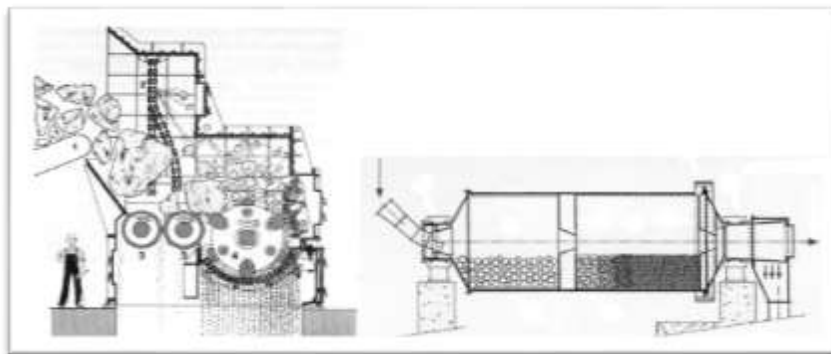


Figure I.4 : Broyage de la matière cru.

I.1.3.4. Homogénéisation

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, qu'on obtient un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit [5].

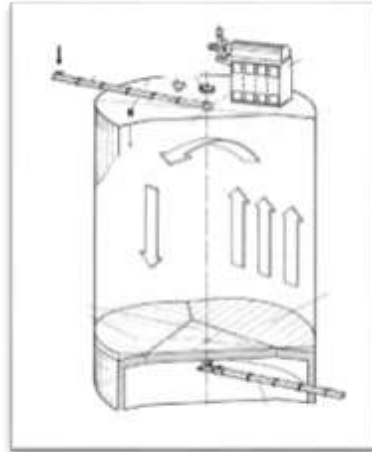


Figure I.5 : Silo homogénéisation de la matière crue.

I.1.3.5. Cuisson

La cuisson a été réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5m de diamètre et de 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (de 150 m dans le procédé par voie humide), à une température comprise entre 1400 et 1500 °C, la cuisson permet de transformer du cru en clinker.

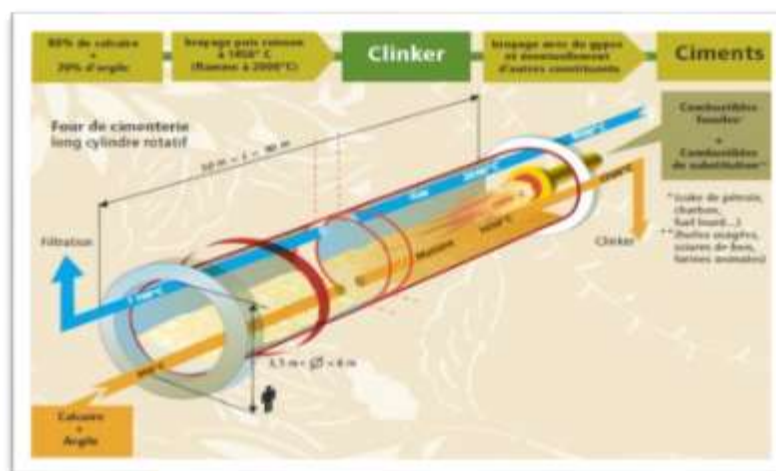


Figure I.6 : Four rotatif à ciment 'le cœur de la cimenterie' [7]

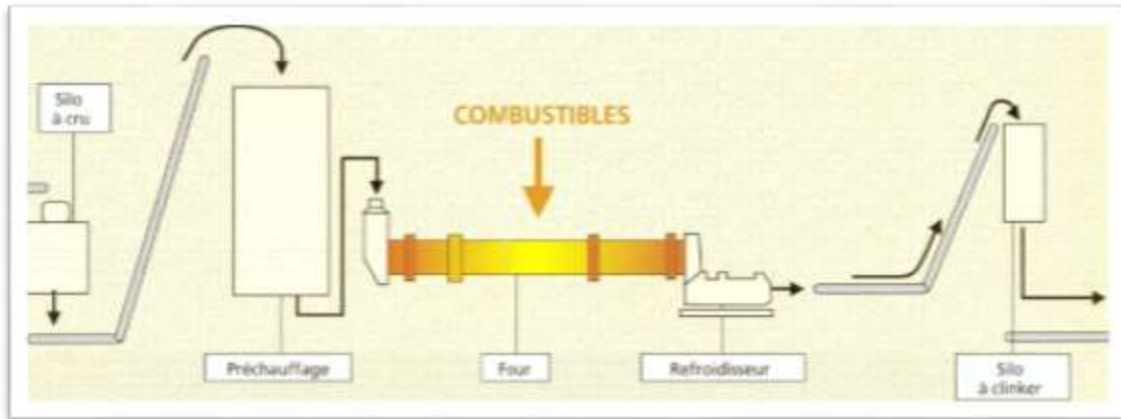


Figure I.7 : La ligne de cuisson (fabrication du clinker).

Le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant.
- La décomposition des argiles qui se situe au-dessus de 500°C.
- La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000°C.
- La formation du clinker ou clinkérisation à 1450 °C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur.

I.1.3.6. Refroidissement

Le refroidissement est une opération qui a pour but d'abaisser la température du clinker, qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four, à environ 100 à 200 °C selon les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment : un refroidissement trop lent peut entraîner la libération de chaux libre et la transformation du C_3S en C_2S , ce qui entraîne une baisse des résistances. [5].

I.1.3.7. Broyage

Le broyage a été réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. L'objectif du broyage est, d'une part, de réduire les granules de clinker en poudre, et d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi que des éventuels autres constituants (laitier, calcaire pur, etc.), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés. [5].

Le broyage a été réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. L'objectif du broyage est, d'une part, de réduire les granules de clinker en poudre, et d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi que des éventuels autres constituants (laitier, calcaire pur, etc.), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

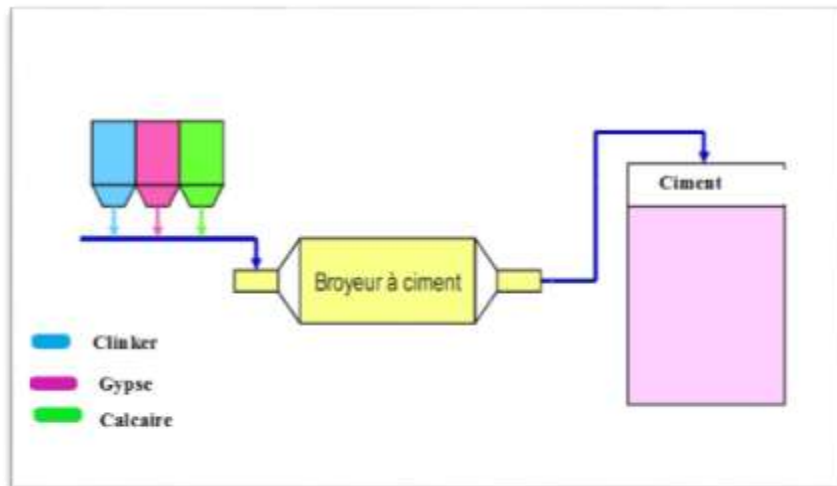


Figure I.8 : Broyeur du clinker.

I.1.3.8. Stockage, Ensachage et Expédition du ciment :

À la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure [5].

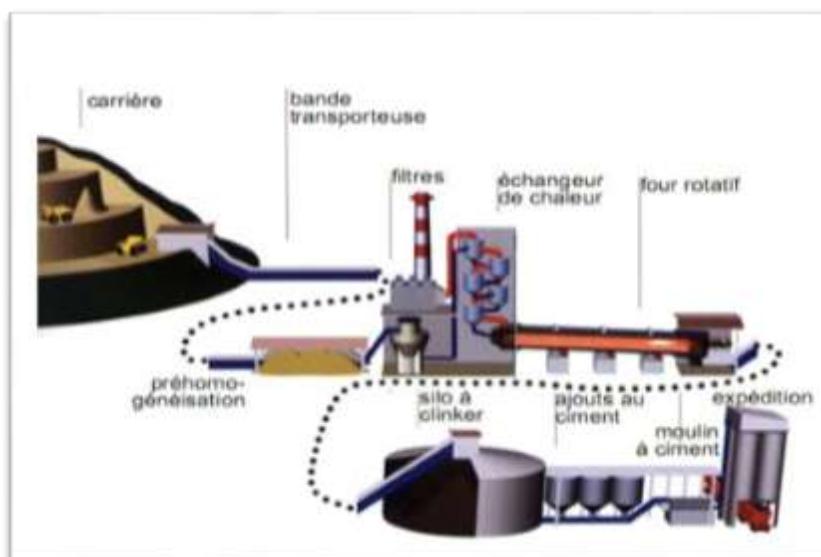


Figure I.9: Schéma de production du ciment.

I.1.4. Types de ciment et leurs applications

Ce sont des constituants autres que le gypse. Ils sont ou non ajoutée au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau I.1 donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, avec leurs désignations propres et du pourcentage respectifs des constituants qu'ils comportent [5], et le tableau I.2 donne leurs applications. Les normes NA 442 et EN 197-1 [8] définie cinq types de ciments. Ils sont classés en fonction de leur composition :

- **Ciment portland**

Dénoté CPA-CEM I, il contient 95% de clinker et 5% de Fillers. Ces ciments se caractérisent par leur classe de résistance à la compression exprimée en MPa à 28 jours : 32,5 - 42,5 et 52,5.

- **Le ciment portland composé**

Il existe deux classes de ciment selon la norme EN 197-1[9] CEMII/A et CEMII/B contenue de pourcentage de 20 et 35 % de la chaux respectivement [10]. Ils contiennent au moins 65 % de clinker et 5 % de gypse et 30 % d'autres additifs comme laitier de haut fourneau, silice fumée pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires [11].

- **Ciment de haut fourneau :**

Dénoté CHF CEM III/A (contenant 36 à 65% de laitier de haut fourneau).

Dénoté CHF CEM III/B (contenant 66 à 80% de laitier de haut fourneau).

Dénoté CHF CEM III/C (contenant 81 à 95% de laitier de haut fourneau).

- **Ciment pouzzolanique :**

Dénoté CPS CEM IV/A contenant 11 à 35% de constituants, fumée de silice, pouzzolane et cendres volantes.

Dénoté CPS CEM IV/B, contenant 36 à 55% de constituants, fumée de silice, pouzzolane et cendres volantes.

- **Ciment composé :**

Dénoté CPS CEM V/A, contenant 18 à 30% de constituants, pouzzolane et cendres volantes.

Dénoté CPS CEM V/B, contenant 31 à 50% de constituants, pouzzolane et cendres volantes.

Tableau I.1. Les différents types de ciment courants [11].

Désignation	Type de ciment	Teneur en clinker	Teneur (%) de l'un des constituants suivants : laitier-pouzzolane- cendre - calcaires – schistes - fumée de silice	Matière secondaire
CPA – CEMI	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ - CEMII/A	Ciment Portland composé	80 à 94 %	• De 6 à 20 % de l'un quelconque de constituant	0 à 5 %
CPJ - CEMII/B		65 à 79 %	• De 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 %
CHF-CEMIII/A	Ciment haute fourneau x	35 à 65 %	• 36 à 65 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CHF-CEMIII/B		20 à 34 %	• 66 à 80 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CHF-CEMIII/C		5 à 19 %	• 81 à 95 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CPS-CEMIV/A	Ciment de haut fourneau	65 à 90 %	• 10 à 35 % de pouzzolane, cendre siliceuse ou fumée de silice. Ces derniers étant limités à 10 %	0 à 5 %
CPS- CEMIV/B		45 à 64 %	• 36 à 55 % comme ci-dessus	

Tableau I.2. Utilisation du ciment des ciments courants [12].

Ciment	Utilisation
CEM I	<p>Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué.</p> <p>Béton précontraint.</p> <p>Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R)</p> <p>Bétonnage jusqu'à une température extérieure entre 5 et 10° C.</p> <p>Béton étuvé ou auto-étuvé.</p>
CEM II / A ou B	<p>Ces ciments sont les plus couramment utilisés</p> <p>CEM II/A ou B classe R : travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple).</p> <p>Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants.</p> <p>Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.</p> <p>Dallages, sols industriels.</p> <p>Maçonneries.</p> <p>Stabilisation des sols.</p>
<p>CEM III / A, B</p> <p>Ou C</p> <p>CEM V / A ou B</p>	<p>Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égouts, eaux industrielles...).</p> <p>Ouvrages en milieux sulfatés : les ciments utilisés sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NF P 15319.</p> <p>Travaux à la mer : les ciments utilisés sont tous PM, ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317.</p> <p>Bétons de masse.</p> <p>Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondations).</p> <p>Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation.</p> <p>Stabilisation des sols.</p>

I.1.5. Propriétés physico-chimiques du ciment

I.1.5.1. Propriétés chimiques

- **Composition chimique du ciment**

Le ciment portland résulte du broyage du clinker qui se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée. Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange dont les proportions de calcaire (80%) et d'argile (20%) et ajoute 5% de gypse (CaSO₄, 2H₂O) pour régulariser la prise du ciment [13]. Les principaux oxydes représentés dans le Tableau I.3 est en pourcentage (%) pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence des rayons X (FRX) d'un clinker de ciment portland. La composition élémentaire de l'échantillon est représentée dans le tableau I.3 [14].

. **Tableau I.3.** Composition chimique du clinker [11].

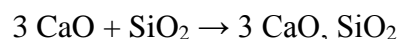
Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
Fourchette(%)	62-68	18-24	4- 8	2 – 5	0 -5	0 - 5	0 – 2	0 - 2	0 – 2
Moyenne(%)	65.91	21.15	5.82	3.37	0.93	0.08	0.78	0.17	0.2

En plus, on a encore la présence de certaines impuretés et d'autres oxydes dans le clinker à très faibles proportions à savoir : P₂O₅, MnO....

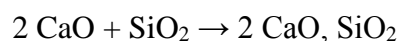
- **Composition minéralogique du ciment**

La composition minéralogique du ciment portland est fonction du mélange (clinker+gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de son refroidissement (trempe à l'air) [14]. Le clinker est composé de quatre minéraux principaux :

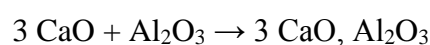
- Silicate tricalcique C₃S Alit (3CaO, SiO₂) :



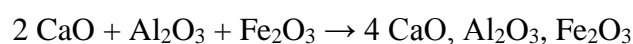
- Silicate bicalcique C₂S Bélite (2CaO, SiO₂).



- Aluminate tricalcique C₃A Célide (3CaO, Al₂O₃).



- Aluminoferrite tétracalcique C₄AF Célide (4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃).



Les silicates de calcium C_3S et C_2S représentent à peu près 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge [15, 16, 17].

La composition minéralogique peut être déterminée approximativement à partir de l'analyse chimique et à l'aide des formules de Bogue (R. H) [18]. Le tableau I.3 indique la composition minéralogique moyenne d'un ciment portland et les teneurs extrémales de chacun de ses constituants.

Tableau I.4 . Composition moyenne d'un ciment portland artificiel et teneurs extrémales à chacun de ses constituants d'après Vénuat (M) [19].

Constituants	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Composition moyenne (%)	58.17	15.35	9.72	10.24
Teneurs extrémales	50-75	7-30	0-18	4-20

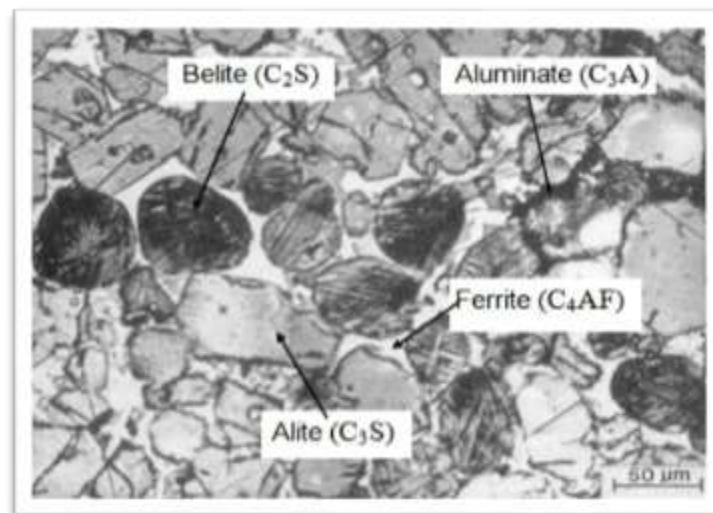


Figure I.10 . Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland [20].

- **Caractéristique de ciment**
 - **Caractérisation par la Spectrométrie de fluorescence X**

La fluorescence des rayons X est une méthode physique d'analyse ayant pour objet la détermination qualitative des éléments constituant les échantillons donnés et surtout pour avoir les analyses quantitatives à une cadence rapide et avec une précision très appréciable. L'échantillon est irradié par un faisceau de rayon X produit par le tube, chaque élément constituant l'échantillon émet ses propres radiations de fluorescence. Le faisceau de radiation est ensuite dirigé par le collimateur (deux positions, l'une fine et l'autre large) vers le cristal analyseur qui va diffracter chaque radiation de longueur d'onde donnée dans un angle correspondant de façon à satisfaire la loi de BRAGG. [21]

- **Caractérisation par Diffraction de rayon X (DRX)**

Cette méthode est essentielle dans l'identification des assemblages argileux complexes. La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ($0.1 < \lambda < 10$ nm) sur un échantillon. Le rayonnement pénètre dans le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par la loi de Bragg [21] :

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

Où :

n : nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction

λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé

d : distance interréticulaire

θ : angle de diffraction.

I.1.5.2. Propriétés physiques du ciment

- **La surface spécifique du Blaine (finesse)**

Par définition La surface spécifique de Blaine : c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre qui permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6) [22]. Elle s'exprime en cm²/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm²/g. Lors du gâchage du ciment, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée. L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé « Perméabilimètre de Blaine ».

La surface spécifique est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$s = \frac{k}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1\eta}}$$

Avec :

S : Surface spécifique cm²/g).

k : Constante de l'appareil.

e : Porosité de la ouchetassée

t : Temps mesuré en econdes.

ρ : Masse volumique (g/cm³).

η : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

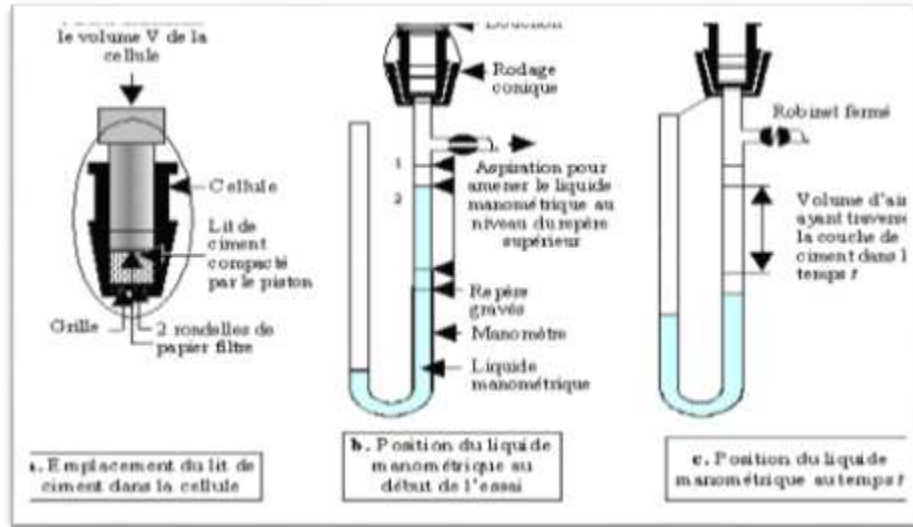


Figure I.11 . Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine [22].

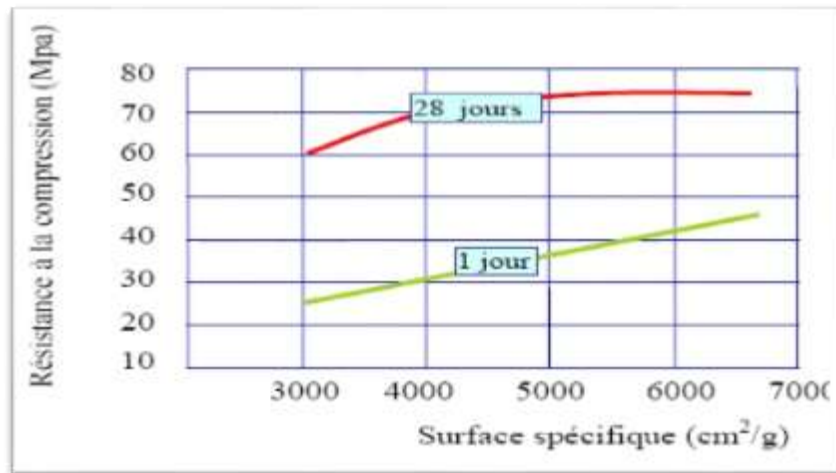


Figure I.12 . Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

- **La masse volumique apparente**

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus).

Elle est de l'ordre de 1000 kg/m³ (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment [11].

- **La masse volumique absolue**

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m³ suivant le type de ciment [11].

- **La prise**

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à des nombreux paramètres :

- Le type du ciment : certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance.
- La finesse de mouture : le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande.
- La température ambiante : la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30 °C.
- La présence de matières organiques dans l'eau.
- L'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur.

Pour mesurer le temps de début et de fin de prise, on utilise généralement l'essai de "Vicat", NF EN 196-3 [23]. La norme spécifie suivant les ciments, un temps de prise minimale de :

1 h 30 pour les ciments des classes 32,5.

1 h pour les ciments des classes 42,5-42,5 R- 52,5-52,5 R [6].

- **Expansion**

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation de l'oxyde de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier [24] qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaire d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau bouillante, la valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courants. Le pourcentage maximal de magnésie est limité, sa valeur, spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5% pour les CPA-CEM I ainsi pour le clinker [6], L'expansion est mesurée selon NF EN 196-3[23].

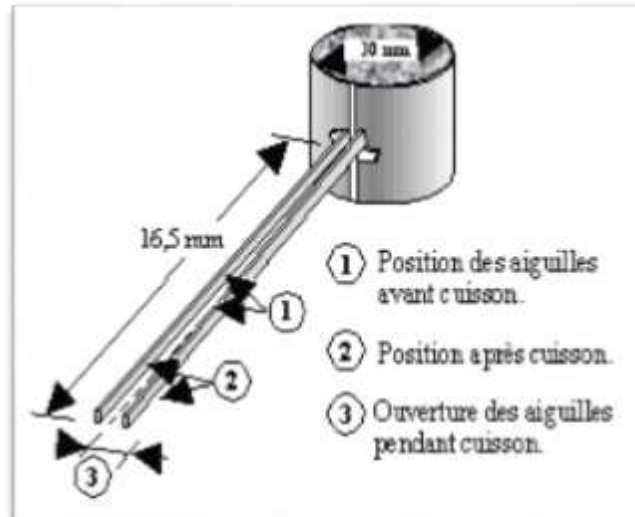


Figure I.13. Aiguilles de Le Chatelier [24].

- **La consistance**

La consistance est le pourcentage optimal d'eau qui permet d'obtenir une pâte de ciment de consistance normale. On utilise généralement l'appareil de « Vicat » pour mesurer cette consistance, NF EN 196-3 [23]. La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « CONSISTANCE NORMALISEE ».

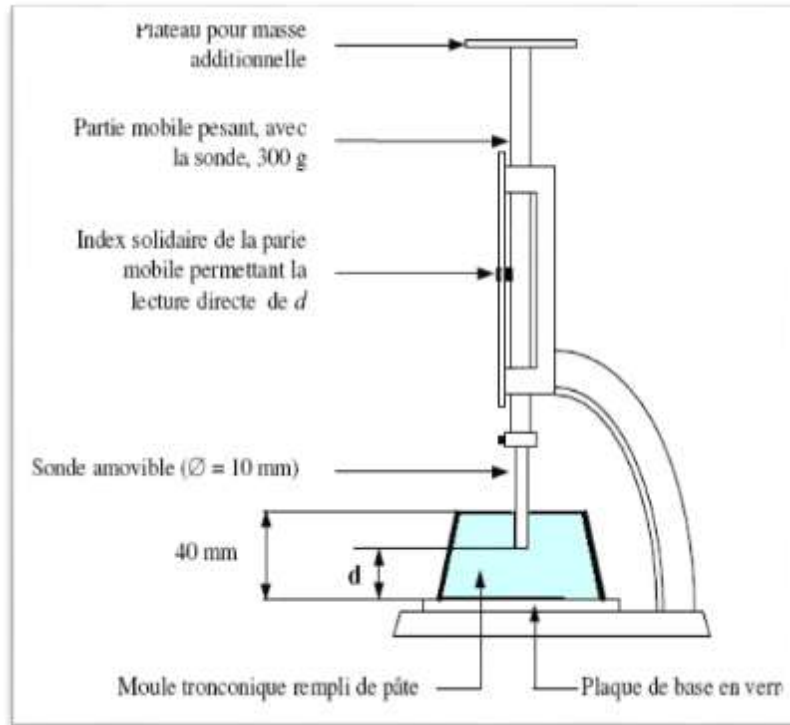


Figure I.14. Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance [23].

I.1.6. Propriétés mécaniques du ciment

I.1.6.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression mesure la capacité du ciment ou du béton à résister à des forces de compression. Elle est généralement la plus élevée des trois résistances et est essentielle pour les applications structurales. Les essais de compression sont réalisés en appliquant une charge croissante sur des échantillons cubiques ou cylindriques jusqu'à ce qu'ils se brisent. Selon la norme ASTM C39/C39M [25], ce test est couramment utilisé pour évaluer la résistance à la compression du béton.

I.1.6.2. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion, ou module de rupture, évalue la capacité du matériau à résister à des forces de flexion. Cet essai est important pour les structures soumises à des charges de flexion, comme les dalles et les poutres. Le test est réalisé en soumettant une poutre de ciment ou de béton à une charge jusqu'à rupture, conformément à la norme ASTM C78/C78M [26].

I.1.6.3. Résistance à la traction

La résistance à la traction mesure la capacité du ciment ou du béton à résister à des forces de traction, c'est-à-dire des forces qui tendent à l'étirer. Le béton a généralement une faible résistance à la traction, ce qui le rend vulnérable aux fissures sous des charges de traction. La résistance à la traction peut être déterminée par des essais directs ou indirects, comme le test de fendage (test brésilien), décrit dans la norme ASTM C496/C496M [27] et EN 12390-6[28].

Tableau I.5 . Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe [6].

Désignation de la classe de résistance	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à courte terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	–	≥ 16	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	≥ 10	–		
42,5 N	≥ 10	–	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20	–		
52,5 N	≥ 20	–	$\geq 52,5$	–
52,5 R	≥ 30	–		

I.1.7. Facteurs influençant les propriétés du ciment

I.1.7.1. Composition chimique

La composition chimique du ciment est l'un des principaux facteurs qui influencent ses propriétés physiques et mécaniques. Les composants principaux du ciment Portland typique incluent le calcaire (CaCO_3), l'argile (Al_2O_3 , SiO_2), et le gypse (CaSO_4). Voici les principaux composants chimiques et leurs impacts sur les propriétés du ciment :

- **Tricalcium silicate (C3S)**

Le C3S est responsable de la résistance initiale du ciment. Il hydrate rapidement et contribue à la prise et au développement de la résistance dans les premiers jours [29].

- **Dicalcium silicate (C2S)**

Le C2S hydrate plus lentement que le C3S et contribue à la résistance à long terme du ciment. Il améliore également la durabilité du béton [30].

- **Tricalcium aluminate (C3A)**

Le C3A hydrate très rapidement et contribue à la chaleur d'hydratation. Une teneur élevée en C3A peut entraîner une prise rapide et des problèmes de fissuration [31].

- **Tétracalcium aluminoferrite (C4AF)**

Le C4AF a un effet mineur sur les propriétés mécaniques, mais il influence la couleur du ciment et contribue à la formation de la structure cristalline du ciment [32]

- **Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)**

Le gypse est ajouté au clinker pour contrôler la prise du ciment. Il régule la vitesse d'hydratation du C3A, empêchant une prise trop rapide [33].

- **Les ajouts minéraux**

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physicomécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CPJ-CEMII/ A ou B), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. ; Il existe deux ajouts minéraux actifs comme le laitier de haut fourneau, la pouzzolane, et la fumée de silice ; et des ajouts inertes comme le calcaire. Les principaux ajouts minéraux :

➤ **Calcaires**

C'est un matériau très finement broyé, qui joue un rôle de remplissage des vides entre les granulats de sable et de graviers, tout en présentant une certaine activité chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques (C3S) [33]. Il représente plus de 5% de la masse totale du ciment et doit présenter une proportion de carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75% en masse [6]. La structure tridimensionnelle du calcaire est donnée sur le schéma 1.

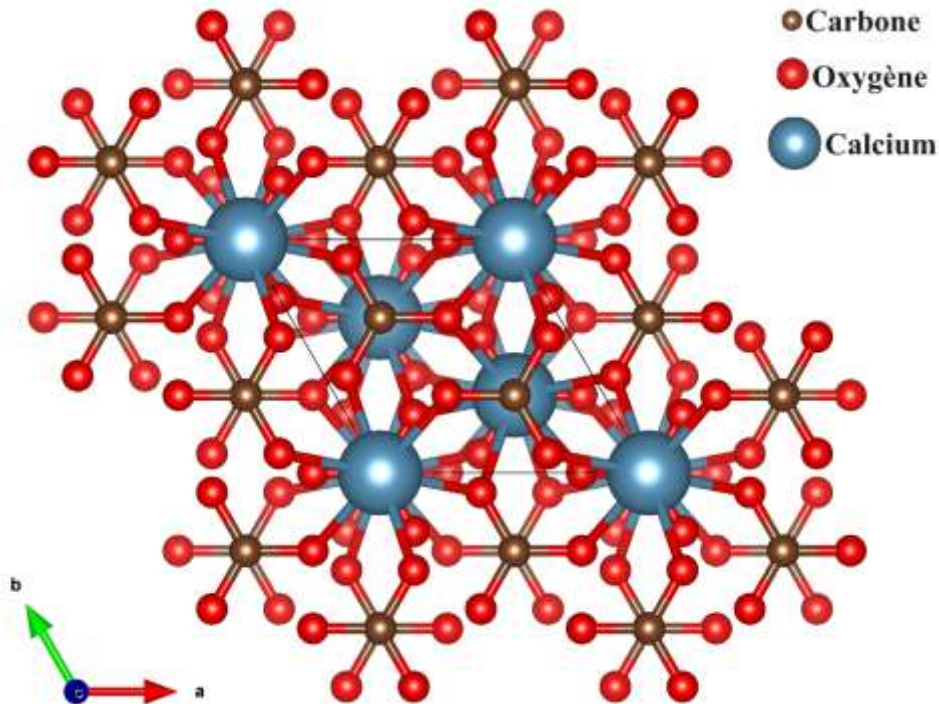


Schéma 1. Structure tridimensionnelle de CaCO_3 .

➤ **Pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, Elles sont essentiellement composées de silice réactive dans des proportions supérieures à 25 % d'alumine et d'oxyde de fer [6].

➤ **Cendres volantes**

Les cendres volantes, présente sous forme de poudre de grande finesse, résultants du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Selon la norme NF EN 450 [34]. Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses sous forme sphériques a surface spécifique de Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg . Du point de vue minéralogique, les cendres volantes se divisent en deux classes, qui diffèrent l'une par rapport à l'autre par leur teneur en CaO selon la norme ASTM C 618-94 [35] :

Classe F : les cendres volantes contenant moins de 10 % de CaO produit de la combustion de l'anthracite et du charbon bitumineux.

Classe C : les cendres volantes contenant entre 15 % et 35 % de CaO produit de la combustion du lignite.

➤ **Fumées de silice**

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe, En outre, en raison de leur finesse qui valorise par (20 m²/g). Et. Egalement les fumées de silice se caractérisent par une surface spécifique variée de 20 à 25 m²/g [36]. Elles complètent la granulométrie des ciments, ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Elles doivent contenir au moins 85 % de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes [11]. Selon la norme NA 442 et la norme EN 197-1 [8]. La proportion de fumée de silice dans le ciment est limitée à 10 % en masse.

➤ **Les schistes calcinés**

Les schistes calcinés, appelé aussi les schistes bitumineux calcinés, sont fabriqués dans un four spécial à une température d'environ 800°C, ils sont finement broyés. Ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et pouzzolaniques. Du fait de la composition de la matière naturelle et du procédé de production, les schistes calcinés contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique, de même que de petites quantités de chaux libre CaO et de sulfate de calcium, ainsi que des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, particulièrement SiO₂ [6].

➤ **Laitier granulé de haut fourneau**

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau [6]. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment. Il présente sous forme des nodules, dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 % de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantités.

I.1.7.2. Rapport eau/ciment

Le rapport eau/ciment (rapport E/C) est un facteur crucial qui influence les propriétés du ciment et du béton. Il est défini comme le rapport entre la masse d'eau et la masse de ciment dans un mélange de béton. Voici comment le rapport E/C influence les différentes propriétés du ciment et du béton:

- **Résistance à la compression**

Un rapport E/C faible conduit à une plus grande résistance à la compression, car il y a moins d'eau en excès pour créer des vides dans la matrice du béton après l'hydratation. À l'inverse, un rapport E/C élevé diminue la résistance, car un excès d'eau crée plus de porosité [37].

- **Durabilité**

Un faible rapport E/C améliore la durabilité du béton en réduisant sa perméabilité, ce qui le rend moins susceptible aux attaques chimiques et à la pénétration de substances agressives comme les sulfates et les chlorures. Un rapport E/C élevé augmente la porosité, réduisant la durabilité [38].

- **Temps de prise et hydratation**

Le rapport E/C influence également le taux d'hydratation du ciment. Un rapport E/C élevé peut retarder le temps de prise initial, tandis qu'un rapport E/C faible peut accélérer le processus de prise [39].

- **Retrait et fissuration**

Un rapport E/C élevé peut entraîner un retrait plastique plus important et une plus grande tendance à la fissuration en raison de la quantité plus importante d'eau à évaporer. Un rapport E/C faible réduit ces risques [40].

I.1.8. Présentation de la cimenterie d'oued Sly Chlef

L'Entreprise des Ciments et Dérivés de CHLEF (E.C.D.E.) est une entreprise publique créée par Décret N°82/325 du 30/10/1982 à la suite de la restructuration de la Société Nationale des Matériaux de Construction (S.N.M.C.) [41]. Elle est devenue une entreprise publique économique (E.P.E.) par acte notarié du 09/10/1989, elle est la propriété exclusive de la société de gestion des participations « Groupement Industrie du Ciment d'Algérie » SGP GICA, une société mère qui compte trois autres entreprises ; l'Entreprise régionale de ciment du centre E.R.C.C., celle de l'ouest E.R.C.O et de l'est E.R.C.E.



Figure I.15. Cimenterie d'OUED-SLY CHLEF

- **Situation Géographique de la Cimenterie**

Implantée sur une superficie de 40 hectares, la cimenterie de l'E.C.D.E. est située dans la zone industrielle d'OUED-SLY à 8 kms à l'ouest de la ville de CHLEF, à 40 kms du port de Ténès, à 10 kms de l'aéroport de CHLEF et elle est mitoyenne de la RN 4 et de l'autoroute Est-Ouest [41].

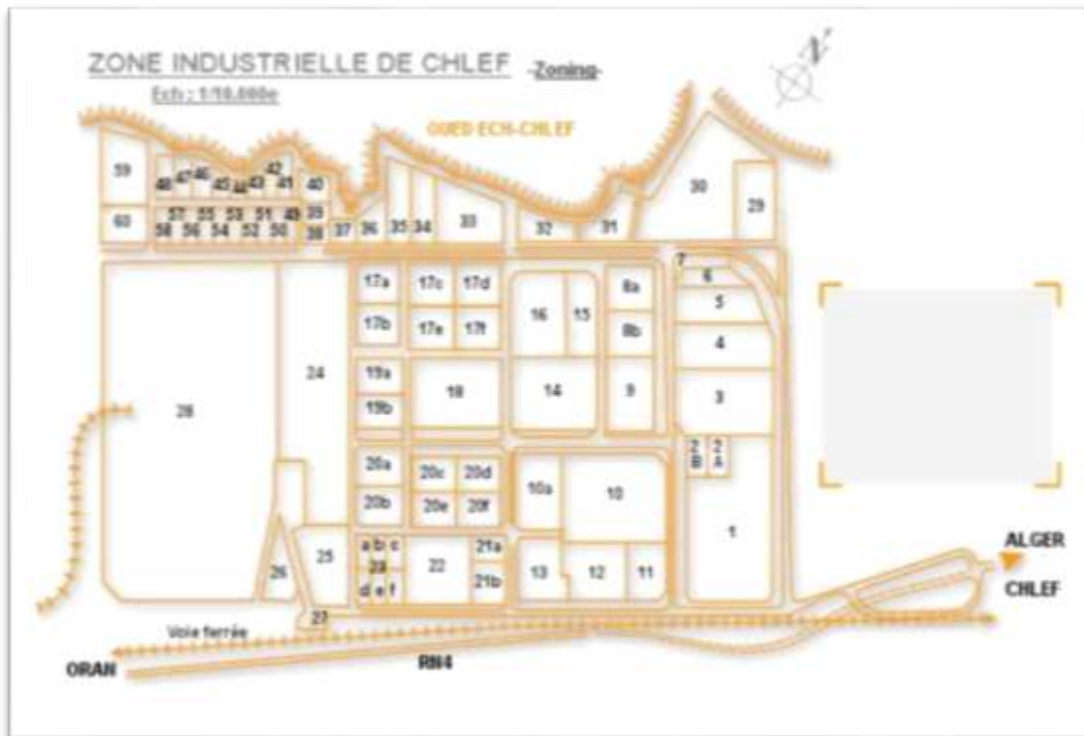


Figure I.16. Plan de la zone industrielle d'OUED-SLY

- **Production**

Selon les prévisions de l'entreprise la cimenterie doit produire annuellement : clinker 2.104.589 tonnes et ciment 2.440.509 tonnes. D'après le rapport argile/calcaire correspondant à 13% (déterminé par le laboratoire) il faut 1,494 tonne de mélange pour fabriquer une tonne de clinker soit 1,32 tonne de calcaire et 0,17 d'argile donc la carrière doit fournir annuellement environ 2.800.000 de tonnes de calcaire et 360.000 tonnes d'argile pour satisfaire les besoins en matières premières pour la fabrication du ciment.

- **Ateliers de production**

Unitaire de 1.000.000 de tonnes de ciment par an et dont les principaux ateliers sont :

- Parc de pré homogénéisation de 1.000.000 tonnes.
- Deux ateliers de broyages du cru de 320 t/h chacun.
- Deux ateliers de cuisson de 3600 t/j de clinker chacun.
- Un stockage de clinker composé d'un hall couvert de 40.000 t.
- Huit silos de clinker d'une capacité totale de 48.000 t.

Le broyage du ciment est réalisé par trois broyeurs de ciment à boulet d'une capacité globale de 350 t/h et un broyeur BK 4 d'une capacité de 100 t/h, enfin un stockage du produit fini de 60.000 tonne réparties en 10 silos [41].

- **Gisements de matières premières**

Pour sa production de matières premières l'usine de ciment exploite les gisements suivants :

- Le gisement de calcaire pur est situé à 3 km de l'usine, avec des réserves estimées à 173.000.000 tonnes correspondant à 70 ans d'exploitation à pleine capacité. Des possibilités d'extension sont possibles pour une autonomie pouvant dépasser 100 ans.
- Le gisement d'argile situé à 6 km de l'usine, présente une capacité de 32.000.000 tonnes pouvant assurer ainsi à l'entreprise une exploitation durant 90 ans environ.
- Le gisement de sable situé à une dizaine de kilomètre de l'usine. Il offre une capacité de 500.000 tonnes soit une durée d'exploitation de 5 ans. Toutefois l'entreprise a procédé à une acquisition d'une extension de la carrière d'une superficie de plus de 7 hectares assurant une exploitation sur 8 ans.
- Le gisement de gypse est situé à 35 km de l'usine et offre des réserves estimées à 6.000.000 tonnes soit plus de 80 ans d'exploitation.
- ❖ L'ECDE procède elle-même à l'extraction des gisements de calcaire et de gypse, la livraison de ce dernier est assurée par la sous-traitante tandis que pour le sable et l'argile, l'extraction et la livraison à l'usine sont assuré par la sous-traitante. La cimenterie est approvisionnée par route ou chemin de fer. L'approvisionnement du minerai de fer et de la pouzzolane est assuré par des sociétés [41].

CHAPITRE II

MATÉRIELS ET MÉTHODES

II. 1. Introduction

Dans le but de mettre en évidence l'influence du calcaire, sur les propriétés mécaniques du ciment CPA-CEM I 52,5. On a effectué une série d'essais chimiques, physiques et mécaniques dans laboratoire de la cimenterie d'oued Sly Chlef.

La mise en évidence des caractéristiques mécaniques des différents échantillons élaborés nécessite des essais mécaniques. Tels que les résistances mécanique (compression et traction par flexion) en fonction de la variation des paramètres essentiels similaires, afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitables, il a été nécessaire de réaliser des essais d'identification.

II.2. Description des matériaux utilisés

II.2.1 Type de ciment étudié

Le ciment étudié est un ciment Portland de type CPA-CEM I/52.5. Le clinker utilisé pour ce ciment provient de la cimenterie d'Oued Sly à Chlef. Pour régulariser le temps de prise, ce clinker est mélangé avec du gypse. La composition chimique du clinker varie en fonction du type de ciment produit, influençant ainsi ses propriétés finales.

Le CPA-CEM I/52.5 se distingue par une finesse de $3933 \text{ cm}^2/\text{g}$ et une masse volumique absolue de 3150 kg/m^3 . Les analyses des compositions chimiques et des propriétés physiques de ce ciment ont été réalisées au sein du laboratoire conformément à la norme P 15-467 [42]. Les résultats détaillés de ces analyses sont présentés dans les tableaux II.1 et II.2.

Tableau II.1.Composition chimique du ciment du clinker d'après la fabrication.

Composante Chimique	Chaux (CaO)	Silice (SiO ₂)	Alumine (Al ₂ O ₃)	Oxyde Ferrique (Fe ₂ O ₃)	Magnésie MgO	Chaux libre (CaO _{libre})
Clinker (%)	65.91	21.15	5,82	3,37	0,93	0,75
Gypse (%)	38.29	6.44	1,85	0,89	0.55	/

Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment d'après la fabrication.

Notation symbolique	Nom	Formule chimique	% en poids moyen
C ₃ S	Silicate tricalcium Ou alite	3CaO, SiO ₂	58.17
C ₂ S	Silicate bicalcique Ou bélite	2CaO, SiO ₂	15.35
C ₃ A	Aluminate tricalcique Ou célite	3CaO, Al ₂ O ₃	9.72
C ₄ AF	Aluminoferrite tétracalcique	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	10.24

Tableau II.3. Caractéristique physico-mécanique du ciment utilisé.

Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)		3933
Début de prise (min)		138
Fin de prise (min)		240
Expansion (mm) <10 mm		1
Age	R _f (MPa)	R _c (MPa)
2 jours	5.15	22.22
7 jours	8.25	50.28
28 jours	8.72	66.75

II.2.2. Additifs

II.2.2.1. Le calcaire

Le calcaire utilisé dans les essais est celui employé comme matière première dans la fabrication du ciment de Chlef (carrière d'Ouled Ben Abdelkader), il est broyé à une finesse d'environ 3400 cm²/g. L'ajout du calcaire doit être conforme à la norme NF P 18-508 [42]. Il est substituable au ciment sous les conditions de la norme NF P18-305 [43]. L'analyse chimique du calcaire est donnée dans le tableau II.4.

Tableau II.4. Analyse chimique du calcaire.

Éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
%	3.23	1.01	0.52	52.97	0.30	0.08	0,13	41,50

II.2.2.2. Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable normalisé CEN EN 196-1[44]. Il s'agit d'un sable naturel siliceux, de préférence à grains arrondis, dont la teneur en silice est au moins de 90%.

II.2.2.3. L'eau

L'eau utilisée c'est l'eau potable du robinet. Cette eau ne contient pas d'impuretés nuisibles aux mélanges

II.3. Méthodologie expérimentale

II.3.1. Préparation des échantillons de ciment

On prépare nos échantillons à partir d'un type de ciment sans ajout CPA- CEM I / 52.5 clinker : 95 à 100%, gypse : 0 à 5%, et ajout 0% qui est utilisé comme un échantillon témoin. Puis selon, un calcul bien déterminé, on arrive à préparer les ciments de différents pourcentages d'ajout (calcaire) (10%, 15%, 20% et 25%).

*Donc, on a 5 échantillons, pesant 1 kg chacun.

Exemple de calcul :

$$1000 \text{ g} \rightarrow 100 \%$$

$$X \rightarrow 10 \%$$

$$X = 100 \text{ g}$$

Donc, pour préparer 1 Kg de ciment à 10% de calcaire nous devons prélever 900 g de ciment et 100 g de calcaire. Puis à l'aide d'un mélangeur, on mélange l'ensemble pendant 3 heures pour avoir un échantillon représentatif.

II.3.2. Analyse chimique et minéralogique des échantillons

II.3.2.1. Par fluorescence X (XRF) [50]

Ces analyses sont réalisées au laboratoire d'essais chimiques d'Oued Sly Chlef et sous la surveillance des employés de la cimenterie, il suffit de broyé 10 g de l'échantillon à une granulométrie inférieure à 63 μm et on ajoute 1g de fondant pour éviter les fissures et on le met dans une pastille. Cette dernière subite une force de 150 K.N ; à l'aide d'une pastilleuse automatique. (Figure II.17).



Figure II.17 . Pastilleuse.

En dernière étape on procède à l'analyse par fluorescence X (XRF) en utilisant le programme correspond à l'échantillon à analysés (la pastille) dans l'analyseur de fluorescence des rayons X (figure18).



Figure II.18 . Analyseur XRF

➤ Étapes pour Calculer la Composition Minéralogique

Pour calculer la composition minéralogique à partir des résultats de l'analyse XRF (fluorescence X), il faut convertir les pourcentages en oxydes élémentaires obtenus par XRF en phases minéralogiques du ciment. Cela implique généralement l'utilisation des formules de Bogue [47], qui permettent de déterminer les phases principales du clinker de ciment Portland: $C_3 S$ (alite), $C_2 S$ (bélite), $C_3 A$ (alumine tricalcique) et $C_4 AF$ (ferrite tétracalcique).

□ **Obtenir les Pourcentages en Oxydes** : on a les pourcentages de CaO , SiO_2 , $Al_2 O_3$, $Fe_2 O_3$, et d'autres oxydes.

□ **Utilisation des Formules de Bogue** : Les formules de Bogue sont des équations empiriques basées sur les pourcentages des principaux oxydes pour estimer les pourcentages des phases minéralogiques dans le clinker.

Les formules sont :

- **$C_3 S$ (Alite)**

$$C_3 S = 4.071(CaO) - 7.602(SiO_2) - 1.429(Fe_2 O_3) - 6.718(Al_2 O_3)$$

- **$C_2 S$ (Bélite)**

$$C_2 S = 2.867(SiO_2) - 0.754(C_3 S)$$

- **$C_3 A$ (Alumine Tricalcique)**

$$C_3 A = 2.650(Al_2 O_3) - 1.692(Fe_2 O_3)$$

- **$C_4 AF$ (Ferrite Tétracalcique)**

$$C_4 AF = 3.043(Fe_2 O_3)$$

□ **Application des Formules de Bogue** : Utilisez les pourcentages de CaO , SiO_2 , $Al_2 O_3$, et $Fe_2 O_3$ de nos résultats XRF dans les formules ci-dessus.

II.3.2.1. Par Diffraction de rayon X (DRX) [50]

Pour préparer et analyser les échantillons de ciment par diffraction des rayons X (DRX), voici les étapes détaillées avec les matériels nécessaires :

- **Préparation des Échantillons**

- **Broyage et Tamissage** : Les échantillons de ciment sont broyés pour obtenir une poudre homogène. La taille des particules est contrôlée pour être fine et uniforme, généralement autour de quelques micromètres.
- **Montage de l'Échantillon** : La poudre est placée sur un porte-échantillon de manière uniforme. L'échantillon doit être compact et lisse pour garantir des résultats précis.

- **Configuration de l'Appareil**
 - **Source de Rayons X** : L'appareil de DRX utilise une source de rayons X, souvent avec une cible de cuivre (Cu) émettant des rayons X avec une longueur d'onde de $1,54186 \text{ \AA}$ (Cu- $K\alpha$).
 - **Paramètres de Tension et de Courant** : La source est généralement réglée à une tension de 40 kV et un courant de 50 mA pour les analyses de ciment.
- **Réglage du Goniomètre**
 - **Angle de Balayage ($\theta/2\theta$)** : Le goniomètre est configuré pour balayer sur une plage d'angles typiquement comprise entre 5° et $80^\circ 2\theta$, couvrant les principales réflexions des phases minérales du ciment.
 - **Pas de Balayage et Vitesse** : Un pas de $0,01^\circ$ et une vitesse adaptée sont choisis pour assurer une bonne résolution des pics de diffraction.
- **Collecte des Données**
 - **Balayage de l'Échantillon** : L'échantillon est exposé aux rayons X et le détecteur mesure l'intensité des rayons X diffractés à différents angles.
 - **Enregistrement des Données** : Les données collectées sont enregistrées sous forme de diffractogramme, représentant l'intensité des rayons X en fonction de l'angle de diffraction.



Figure II.19 . Appareil de DRX

II.3.3. Caractérisation des Échantillons

II.3.3.1. Caractérisation physique

➤ Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine

- **Matériel**

- Perméabilimètre Blaine.
- Balance.
- Tamis.
- Entonnoir.
- Papier filtre
- Chronomètre.

- **Mode opératoire**

Pour déterminer la finesse du ciment ou bien le degré de broyage, Placer la grille au fond de la cellule, appliquer sur cette grille au moyen d'une tige à face intérieure plein. Un disque neuf de papier filtre. Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir. Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler couche supérieure du liant. Puis placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre. Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule. Retirer le piston lentement.

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleure au trait inférieur, Enduire de vaseline la partie.

Rodé de la cellule et la placer sur son ajustage de lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartition la vaseline. Veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible cinquième de seconde Quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait. L'arrêter quand le niveau atteint le troisième trait, Noter le temps écoulait [22].



Figure II.20 . Perméabilimètre de Blaine

➤ **Détermination du pourcentage des refus**

• **Matériel**

- Appareil Alpine
- Un tamis de 45 μm .
- Pinceau.
- Balance.

• **Mode opératoire**

Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur.

- Peser 10 g de ciment
- Tamiser à l'aide d'un pinceau un sur un tamis de 45 μm .
- Les particules au-dessus du tamis représentant le pourcentage des refus.
- L'appareil Alpine donne automatiquement le pourcentage des refus.



Figure II.21. L'appareil Alpine.

➤ **Détermination de la consistance normalisée**

• **Matériel**

- Un appareil Vicat
- Balance.
- Des moules de Vicat de forme tronconique.
- Une plaque de base plane.
- Malaxeur.

• **Mode opératoire**

Les mesures de la consistance normale de la pâte du ciment sont déterminées, selon la norme EN196-3[23].

Le ciment est gâché avec de l'eau potable dans les proportions sont présentés dans le tableau II.5 :

Tableau II.5. Les différents pourcentages de Ciment pour mesurer la consistance.

m ciment (g)	500	500	500	500	500
Eau (ml)	146	141	145	146	149
(E/C)	0,292	0,282	0.290	0.292	0.298
E/C (%)	29.2	28.2	29	29,2	29.8

- On utilise un appareil Vicat (voire les figures 22), qui contient une sonde en métal non corrodable, La forme d'un cylindre droit avoir (50 ± 1) mm de longueur effective et de $(10,00\pm 0,05)$ mm de diamètre. La masse totale des parties mobiles est de (300 ± 1) g. Le mouvement doit être verticale et sans frottement et l'axe doit coïncider avec celui de la sonde.
- Le moule Vicat destiné à contenir la pâte, il doit être en caoutchouc dur, rigide, et de forme tronconique d'une profondeur de $(40\pm 0,2)$ mm et d'un diamètre de (70 ± 5) mm, respectivement. La consistance de la pâte se caractérise plus ou moins par sa grande fluidité. Cet essai est nécessaire pour déterminer le temps de début et fin de prise, ainsi que l'expansion.



Figure II.22. Appareil Vicat.



Figure II.23. Moule Vicat

➤ **Détermination de l'expansion à chaude**

• **Matériel :**

- Moule Le Chatelier.
- Bouilloire Le Chatelier

• **Mode opératoire**

La mesure de l'expansion à chaude du ciment est déterminée, selon la norme NF P 15 433 [48].

- Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 3cm de hauteur et de 3cm de diamètre contenus dans des moules déformables. Sur la périphérie du moule sont soudées deux aiguilles qui amplifient la déformation. La mesure de l'écartement des deux aiguilles

se fait au début et à la fin de l'expérience, pour accélérer la réaction d'hydratation, on précède avec un traitement thermique dans une bouilloire Le Chatelier (figure 25).

- La mesure de l'écartement des deux aiguilles se fait au début et à la fin de l'expérience. Pour accélérer la réaction d'hydratation, on précède avec un traitement thermique dans une bouilloire Le Chatelier. Trois moules à aiguilles de le Chatelier (voire la figure24) sont confectionnées pour mesurer la stabilité aux expansifs d'un ciment CEM I.52,5 sur pâte normale.



Figure II.24. Moule Le Chatelier.



FigureII.25. Bouilloire Le Chatelier

II.3.3.2. Caractérisation mécanique

- **Matériel**

- Malaxeur.
- Moule à alvéoles.
- Table à chocs.
- Balance.
- Chambre humide.
- Presse hydraulique de résistance.

- **Élaboration des Mortiers**

Pour la détermination de la résistance à la compression et à la flexion, on a élaboré des éprouvettes de forme prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Où le mortier contenant $450 \pm 2 \text{ g}$ de ciment, $1350 \pm 5 \text{ g}$ de sable et 225 g d'eau. Le rapport E/C est égal à 0.5 et toujours constante, préparé selon la norme NF EN 196-1[44].

Les éprouvettes sont préparés à partir du sable normalisé NF EN 196-1[44], une quantité d'eau déterminée selon la norme NF EN 196-3[23], et du ciment.

➤ **Préparation des Mortiers**

• **Malaxage**

Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur tel que spécifié dans la norme algérienne NA 442/2000[45], Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Verser l'eau dans le récipient ; Lui ajouter le ciment.
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute ; Dans les 30 dernières secondes, introduire le sable. Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- Arrêter le mouvement pendant 90s ; Avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide.



Figure II.26. Malaxeur.

- **Moulage**

Les moules normalisés permettent de réaliser trois éprouvettes prismatiques de section carrée $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$ (voire la figure 27). Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs, décrit dans la norme algérienne NA 442/2013[46] conformément au mode opératoire suivant :

- Le malaxage du mélange – mortier - étant terminé, disposer celui - ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante ; former une galette approximativement rectangulaire, la partager en 6 fractions sensiblement égales. Le moule ayant été muni de sa hausse, le fixer sur la table à chocs ; introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette ; Égaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse.
- Mettre la machine en marche pour 60 chocs.
- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche. Après 60 nouveaux chocs, le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier.
- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse, araser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.
- Inscrire les marques d'identification des éprouvettes sur le moule.



Figure II.27. Moule à alvéoles.

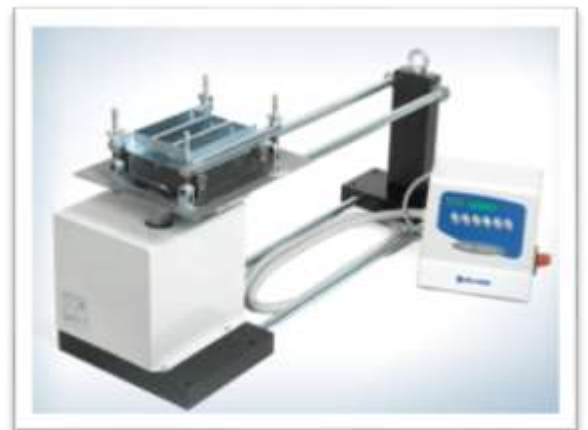


Figure II.28. Table à chocs.

- **Conservation des éprouvettes**

- Poser une plaque en verre ou en acier sur le périmètre de moule
- Placer le moule dans une chambre humide pendant 24 heures (Figure 29).
- Démouler ensuite les éprouvettes avec précautions et marquer les éprouvettes à l'aide d'un stylo marqueur spéciale

L'ensemble est détaillé par la norme EN 196-1[44] comme suit :

Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90%.



Figure II.29. Chambre humide.

On compte l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau jusqu'au début d'essai, Effectuons les essais de la résistance à différentes âge dans les limites suivantes :

- 2 jours ± 30 minutes.
- 7 Jours ± 2 heures.
- 28 Jours ± 8 heures.

- ❖ La caractérisation mécanique qui comporte la détermination de la résistance à la compression et à la flexion des échantillons a été déterminée juste après le durcissement des éprouvettes. Dont on réalise des essais de flexion et de compression de tous nos échantillons et à chaque échéance 2, 7 et 28 jours à l'aide d'une presse hydraulique (figure30). Pour évaluer la contrainte, on triple systématiquement les essais. L'évolution

de la résistance s'améliore en fonction de l'hydratation à condition que la mesure de flexion à trois points il faut que la distance entre les appuis sera 100 mm Les demi-éprouvettes issues de l'essai de flexion sont alors sollicités pour faire la compression. Les essais de compression consistent à comprimer les faces latérales de l'éprouvette entre deux prismes de section carrée 40 mm de côté, que l'on désignera par « blocs de compression».



Figure II.30. Presse hydraulique de résistance.

- **Essais de résistance à la flexion**

- **Dispositif d'essai**

- Le dispositif de flexion comporte deux appuis à section semi – cylindrique de 10 mm de diamètre, distants de 100 ou de 106.7mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant des premiers, et transmettant la charge F.
- Pour permettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux appuis doivent pouvoir osciller légèrement autour de leur centre, le plan vertical au grand axe de l'éprouvette.

- **Machine d'essai**

- Le dispositif à appuis est adapté dans une machine d'essai permettant d'exercer et de mesurer de faibles charges avec une précision de 1% dans les 4/5 supérieurs de l'échelle de mesure.
- La charge F doit croître progressivement de 5 ± 1 daN/s.

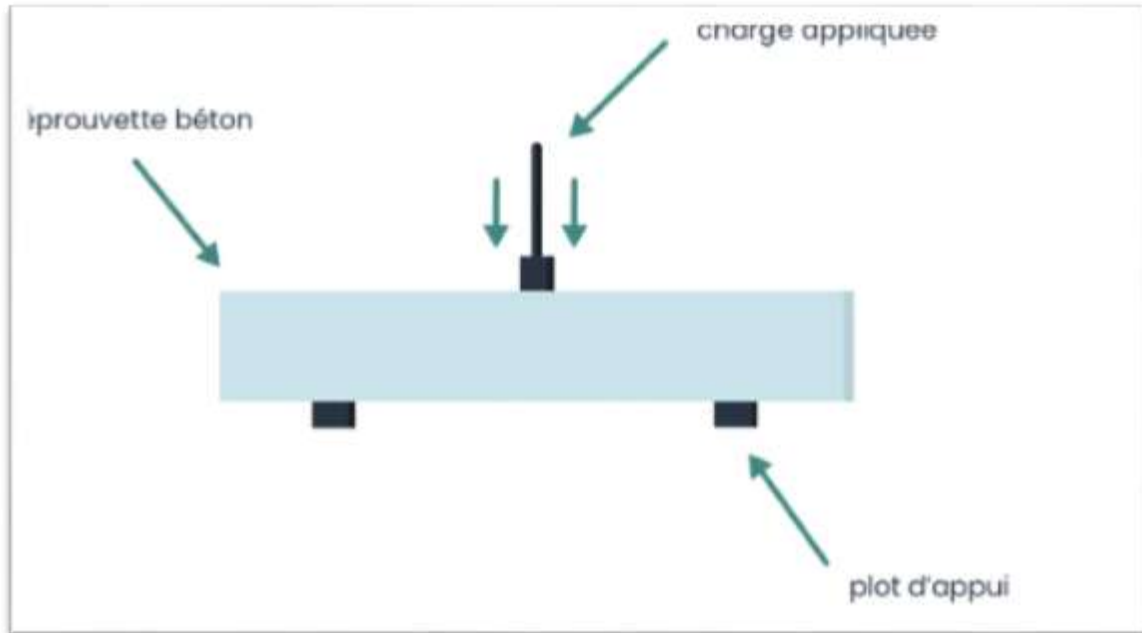


Figure II.31. Essai de flexion.

- **Essais de résistance à la compression [44]**

- **Dispositif d'essai**

- Chaque demi – éprouvette est essayée en compression sur ses faces latérales de moulage, sous une section de 40 * 40mm, entre deux plaques de métal dur 10mm d'épaisseur, de 40mm ± 0.1 mm de largeur, de Longueur supérieure à 40 mm et dont la tolérance de platitude est de 0.01 mm Ces plaques sont en acier dur d'une dureté Vickers d'au moins 600, ou de préférence en carbure de tungstène.
- La demi- éprouvette est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1 cm et que les arêtes longitudinales de l'éprouvette soient perpendiculaires à celles des plaques.
- Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale. L'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait plaques.

- **Machine d'essai**

- L'ensemble du dispositif et de l'éprouvette est placé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications des presses destinées à l'essai de compression des matériaux durs. Il y est placé de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur.

➤ **Conduite de l'essai**

- La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 1 et 2 MPa/s. toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement.

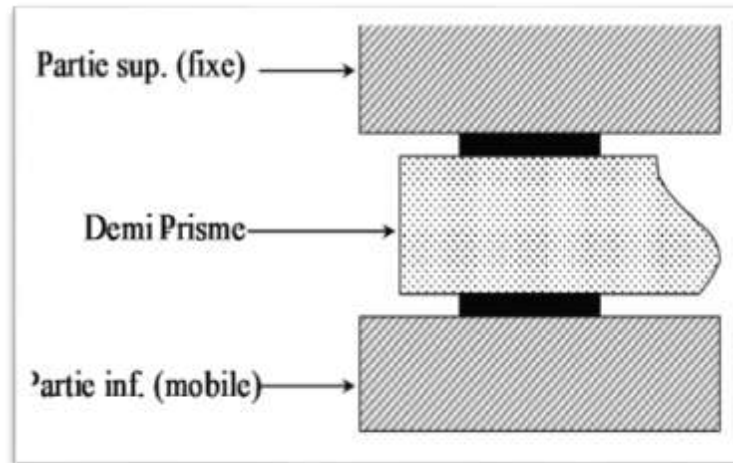


Figure II.32. Essai de compression.

II.4. Conditions de l'expérimentation

II.4.1. Environnement de Laboratoire [49]

- **Température** : Les essais sont réalisés à une température constante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
- **Humidité** : L'humidité relative dans le laboratoire est maintenue à $50 \pm 5\%$.
- **Ventilation** : Le laboratoire est équipé d'un système de ventilation pour assurer un renouvellement d'air adéquat.
- **Propreté** : Le laboratoire est maintenu propre et exempt de poussière pour éviter toute contamination des échantillons.

II.4.2. Équipements [49]

- **Calibration** : Tous les équipements utilisés sont calibrés régulièrement conformément aux normes ISO/IEC 17025.
- **Maintenance** : Les équipements sont entretenus selon les recommandations du fabricant pour garantir leur bon fonctionnement.

II.4.3. Préparation des Échantillons

- **Pesage** : Les matériaux sont pesés avec une balance analytique de précision ± 0.01 g.
- **Mélange** : Les mélanges sont réalisés avec un mélangeur mécanique pour assurer l'homogénéité.

- **Moulage** : Les échantillons sont moulés dans des moules propres et secs, et démoulés après 24 heures.
- **Cure** : Les échantillons sont démoulés après 24 heures et conservés dans une chambre de cure à 20°C et 95% d'humidité relative jusqu'à l'âge de test (7 jours, 28 jours).

II.4.4. Conditions Spécifiques pour les Essais

a. Essais Chimiques

- **Analyse par Fluorescence X (XRF) [50]**
 - **Équipement** : Spectromètre XRF, modèle XYZ.
 - **Conditions** : Échantillons réduits en poudre fine avant analyse.
 - **Objectif** : Déterminer la composition chimique des échantillons.
- **Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX) [51]**
 - **Équipement** : Diffractomètre, modèle PQR.
 - **Conditions** : Échantillons broyés en poudre fine et placés dans des porte-échantillons.
 - **Objectif** : Identifier les phases cristallines présentes dans les échantillons.

b. Essais Physico-Mécaniques

- **Résistance à la Compression [44]**
 - **Équipement** : Presse hydraulique, modèle GHI.
 - **Conditions** : Essais réalisés à 7 jours et 28 jours selon la norme EN 196-1.
 - **Objectif** : Mesurer la résistance à la compression des échantillons.
- **Résistance à la Flexion**
 - **Équipement** : Presse hydraulique, modèle GHI.
 - **Conditions** : Essais réalisés sur les mêmes échantillons après flexion.
 - **Objectif** : Déterminer la résistance à la flexion.
- **Temps de Prise [23]**
 - **Équipement** : Appareil de Vicat, modèle JKL.
 - **Conditions** : Mesures selon la norme EN 196-3.
 - **Objectif** : Déterminer le temps de prise initial et final des mélanges.
- **Surface Spécifique (Blaine) [22]**
 - **Équipement** : Appareil de Blaine, modèle MNO.
 - **Conditions** : Mesures selon la norme EN 196-6.
 - **Objectif** : Déterminer la finesse du ciment.

CHAPITRE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

ET DISCUSSION

Introduction

Les ajouts à base de calcaire sont couramment utilisés pour améliorer les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment. Cette étude vise à évaluer les impacts de ces ajouts sur divers aspects du ciment, en s'appuyant sur une série de tests et d'analyses approfondis.

Nous avons commencé par analyser la composition chimique du ciment modifié à l'aide de la fluorescence des rayons X (XRF) pour identifier les changements induits par les ajouts de calcaire. Des essais physiques ont été réalisés, incluant des tests de surface spécifique Blaine (SSB) pour mesurer la finesse, et des tests de refus pour évaluer la granulométrie. Parallèlement, des essais mécaniques ont été effectués, comprenant des tests de compression et de flexion pour déterminer la résistance du ciment.

Les résultats obtenus offrent une compréhension détaillée de l'impact des ajouts de calcaire sur les performances du ciment. Ils permettent de déterminer les proportions optimales de calcaire à ajouter pour maximiser les bénéfices en termes de résistance et de durabilité, tout en minimisant les effets négatifs potentiels. Les données fournies constituent une base solide pour des applications pratiques dans l'industrie du ciment et ouvrent la voie à de futures recherches dans ce domaine.

III.1. Résultats d'analyse chimique des échantillons**III .1.1. Par fluorescence X**

Les résultats obtenus selon la norme NF EN 196-2 qui correspondent à chaque échantillon sont affichés dans les tableaux suivants :

Tableau III.1. Analyse chimique des échantillons à différents pourcentages de calcaire par fluorescence X.

Concentrations	Composition chimique (%)				
	Ech_0 (0% calcaire)	Ech_1 (10% calcaire)	Ech_2 (15% calcaire)	Ech_3 (20% calcaire)	Ech_4 (25% calcaire)
CaO	63.560	61.728	61.787	62.391	62.906
SiO ₂	21.322	19.830	18.945	17.544	16.637
Al ₂ O ₃	5.688	5.195	4.972	4.755	3.499
Fe ₂ O ₃	3.288	2.916	2.837	2.763	2.649
SO ₃	1.578	1.433	1.375	1.304	1.239
MgO	0.867	0.904	0.880	0.853	0.818
Na ₂ O	0.192	0.205	0.193	0.186	0.172
K ₂ O	0.703	0.709	0.670	0.637	0.604
TiO ₂	0.274	0.265	0.251	0.239	0.227
P ₂ O ₅	0.191	0.181	0.180	0.180	0.178
ZnO	0.009	0.006	0.006	0.006	0.006
SrO	0.063	0.048	0.048	0.049	0.049
Cl	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002

L'ajout de calcaire au ciment CPA-CEM I 52,5 entraîne des variations significatives dans la composition chimique des échantillons :

- **Augmentation légère de CaO** : Avec l'augmentation de la teneur en calcaire, la concentration de CaO augmente légèrement après une diminution initiale.
- **Diminution des autres oxydes principaux (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃)** : Ces oxydes montrent une diminution progressive avec l'ajout de calcaire, indiquant une dilution des composants principaux du clinker.
- **Légères variations dans les oxydes mineurs (MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, ZnO, SrO, Cl)** : Ces oxydes montrent des variations mineures, généralement une légère diminution avec l'augmentation de la teneur en calcaire.

L'ajout de calcaire modifie la composition chimique du ciment, ce qui a plusieurs impacts sur ses propriétés mécaniques et sa réactivité chimique. Bien que des pourcentages modérés de calcaire puissent offrir certains avantages, des pourcentages élevés peuvent réduire la résistance mécanique et la réactivité globale. Ces effets doivent être équilibrés avec les avantages économiques et environnementaux lors de la formulation du ciment.

La composition minéralogique du clinker portland a été déterminée à l'aide de des résultats de l'analyse chimique et en se servant de la méthode de Bogue donnée précédemment. Les résultats sont regroupés dans le tableau III.2. Ils montrent que le clinker de la cimenterie d'Oued-Sly est riche en C₃S avec une teneur de 53,7 %. Cette phase confère au ciment sa

résistance mécanique à la compression. Un équilibre optimal entre les phases est essentiel pour assurer des performances mécaniques et de durabilité adéquates du ciment.

Tableau III.2. Phases minéralogiques du clinker

Phase minéralogique	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Pourcentage (%)	53,70	20,62	9,51	10,00

III .1.2. Résultats de l'analyse par la diffraction de RX

L'analyse par diffraction des rayons X sur poudres a permis d'identifier les minéraux dans le ciment traité selon la norme NF EN 196-2. Les spectres enregistrés des différents échantillons sont représentés sur les figures III-1, III-2, III-3, III-4 et III-5. Comme nous pouvons le constater sur les différents diffractogrammes, le calcaire (CaCO₃) est présent dans tous les échantillons.

- Ech_0 (0% calcaire)

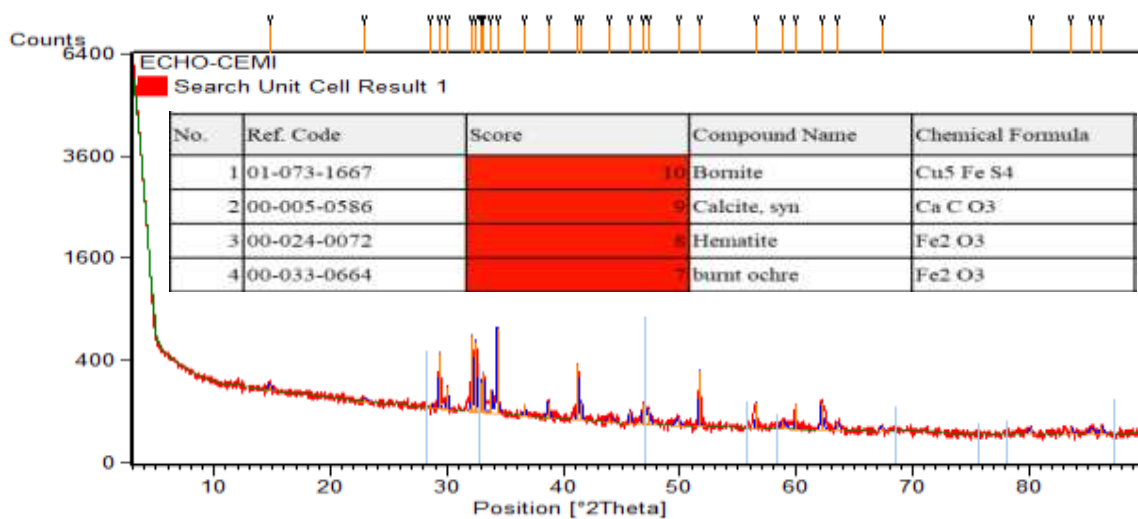


Figure III.1. diffractogramme RX de l'échantillon Ech_0

- Ech_1 (10% calcaire)

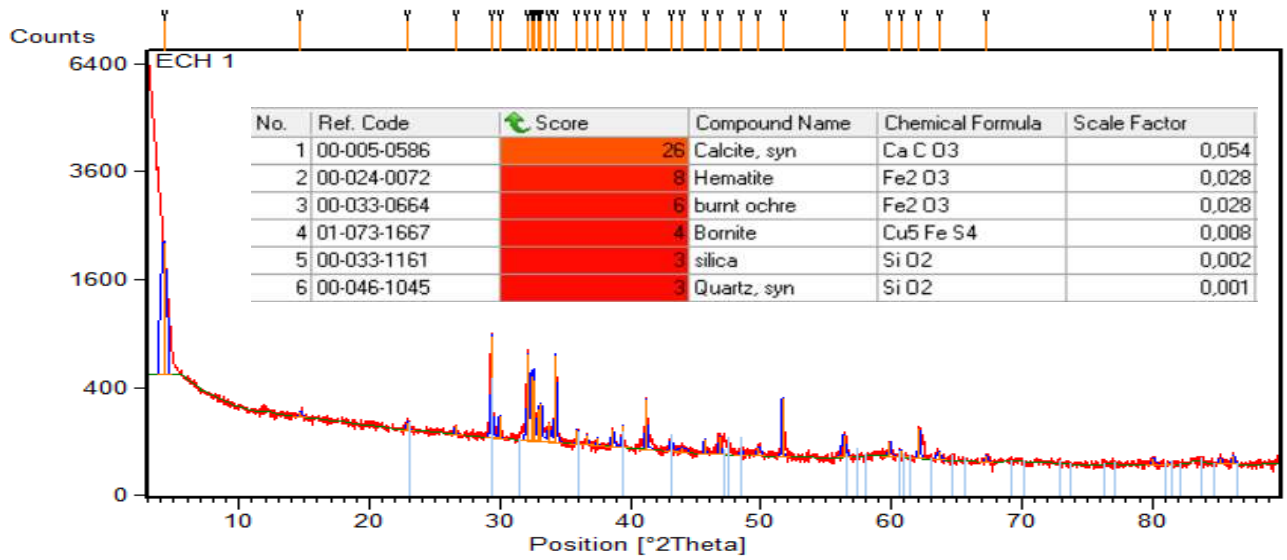


Figure III.2. diffractogramme RX de l'échantillon Ech_1

- Ech_2 (15% calcaire)

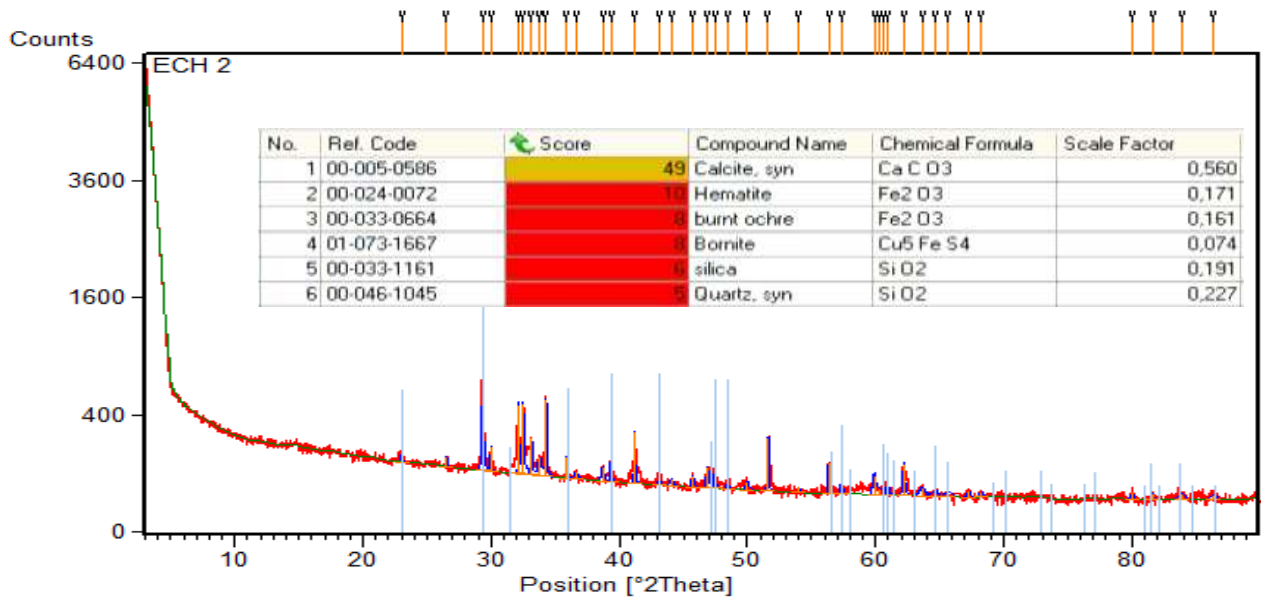


Figure III.3: diffractogramme RX de l'échantillon Ech_2

- Ech_3 (20% calcaire)

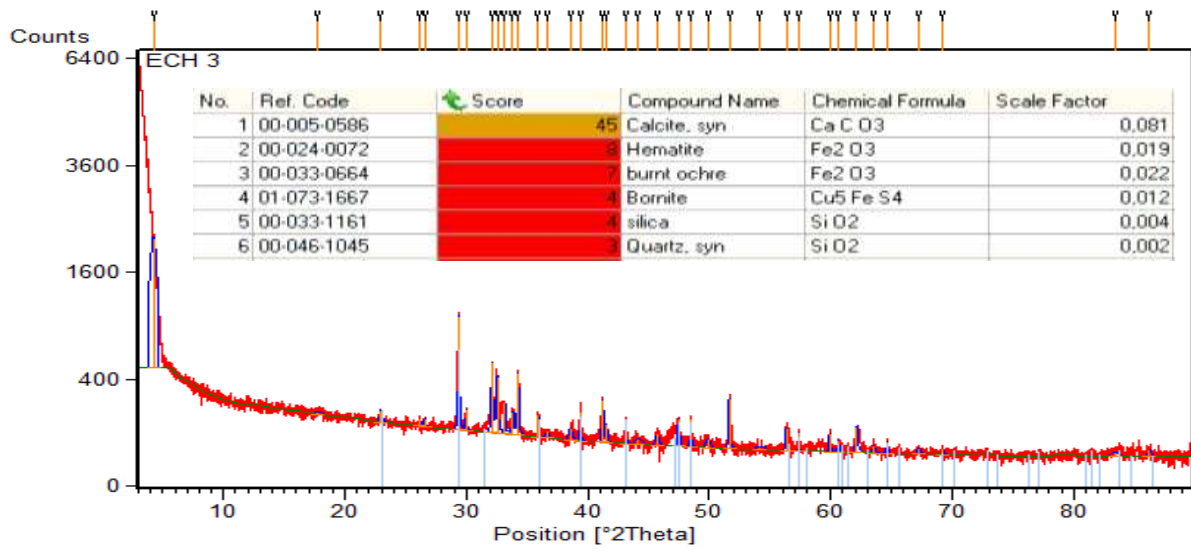


Figure III.4. diffractogramme RX de l'échantillon Ech_3

- Ech_4 (25% calcaire)

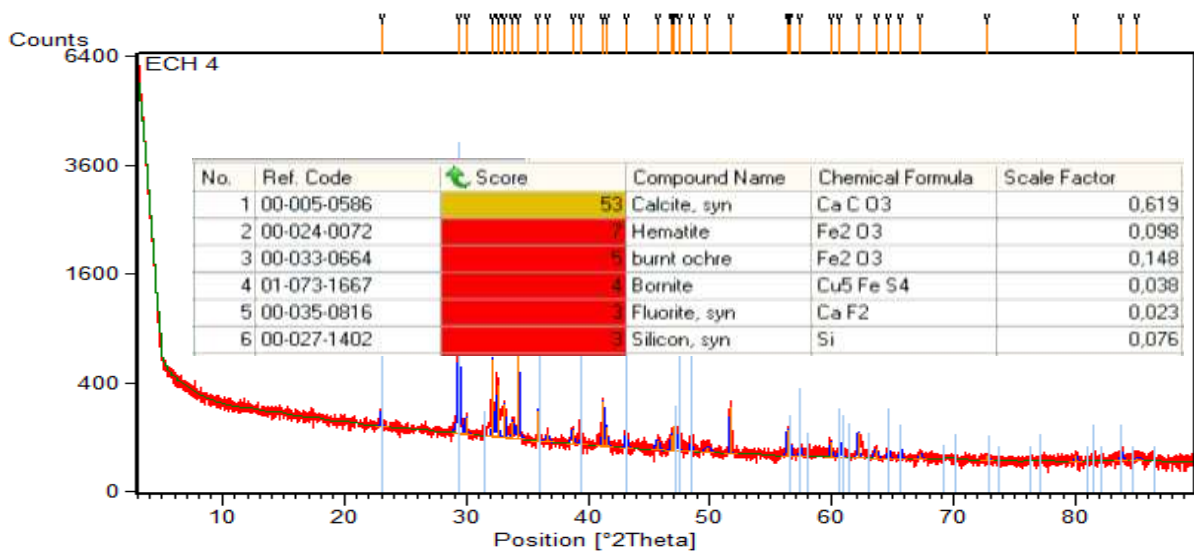


Figure III.5. diffractogramme RX de l'échantillon Ech_4

III .2. Résultats des essais physiques

III .2.1 Surface spécifique Blaine (SSB)

Le tableau suivant donne les surfaces spécifiques de Blaine des différents échantillons selon la norme NF EN 196-6 :

Tableau III.3. Surface spécifique Blaine des échantillons à différents pourcentages de calcaire

Ciment	Ech_0 (0% calcaire)	Ech_1 (10% calcaire)	Ech_2 (15% calcaire)	Ech_3 (20% calcaire)	Ech_4 (25% calcaire)
SSB (cm ² /g)	3933	4162	3873	4261	4831

- Les résultats montrent une augmentation générale de la surface spécifique Blaine avec l'ajout de calcaire, bien que des variations existent à 15% de calcaire. Une surface spécifique plus élevée favorise une hydratation rapide et une résistance initiale plus élevée, mais nécessite des ajustements de la formulation pour maintenir une bonne consistance. L'ajout de calcaire au-delà de 20% entraîne une augmentation significative de la surface spécifique.

III .2.2-Refus sur tamis de 45 µm

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant selon la norme NF EN 196-6 :

Tableau III.4. Refus des échantillons à différents pourcentages de calcaire

Ciment	Ech_0 (0% calcaire)	Ech_1 (10% calcaire)	Ech_2 (15% calcaire)	Ech_3 (20% calcaire)	Ech_4 (25% calcaire)
Refus de 45µm (%)	2	4	3	6	6

- Les résultats montrent que l'ajout de calcaire au ciment entraîne une augmentation du taux de refus sur le tamis de 45 µm, indiquant une diminution de la finesse du ciment. Cela peut avoir un impact négatif sur la réactivité chimique et la résistance.

III .2.3-La consistance normale, temps de début et fin de prise et l'expansion à chaud

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant selon la norme NF EN 196-3 :

Tableau 2.3. Résultats de La consistance normale, temps de début et fin de prise et l'expansion à chaud des échantillons à différents pourcentages de calcaire.

Pourcentage du Calcaire (%)	Consistance normale (ml)	Temps de début de prise (mn)	Temps de fin de prise (mn)	Expansion à chaud (mm)
0	146	138	240	1
10	141	126	239	0
15	145	141	250	0
20	146	150	255	1
25	149	147	240	2

➤ Interprétation

• Consistance Normale

La consistance normale varie légèrement avec l'ajout de calcaire, allant de 141 à 149 ml. Une consistance normale plus élevée avec 25% de calcaire (149 ml) indique que plus d'eau est nécessaire pour obtenir la même fluidité, ce qui peut être dû à l'effet de remplissage des fines particules de calcaire.

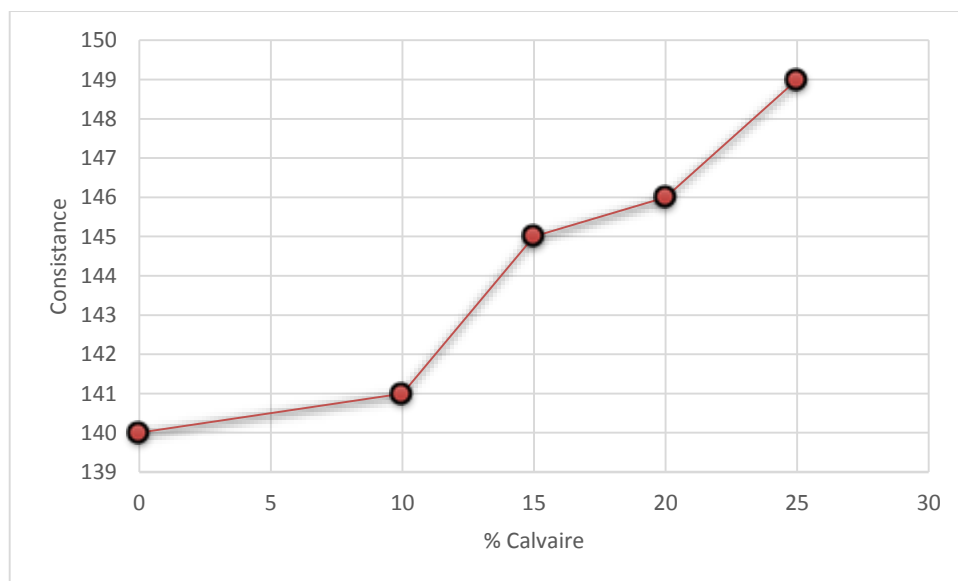


Figure III-6. Evolution de consistance normale en fonction de pourcentage de calcaire

- **Temps de début de prise**

Le temps de début de prise diminue initialement avec 10% de calcaire (126 minutes) puis augmente progressivement à 150 minutes avec 20% de calcaire avant de diminuer légèrement à 147 minutes avec 25% de calcaire. Cela suggère que l'ajout de calcaire affecte la cinétique de l'hydratation, avec une prise initiale plus rapide à faible teneur en calcaire mais un ralentissement à des teneurs plus élevées.

- **Temps de fin de prise**

Le temps de fin de prise varie également, augmentant jusqu'à 255 minutes avec 20% de calcaire avant de redescendre à 240 minutes avec 25% de calcaire. Ceci est cohérent avec les observations de la prise initiale et indique une prise plus longue pour des teneurs modérées en calcaire.

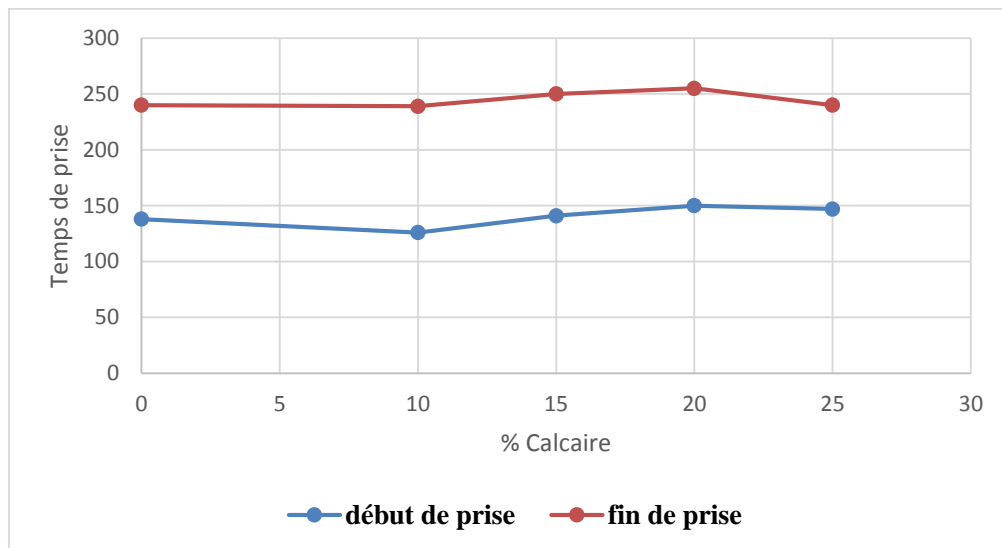


Figure III-7. Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de calcaire

- **Expansion à chaud**

L'expansion à chaud reste faible dans tous les échantillons, variant de 0 à 2 mm. Cependant, une légère augmentation est observée avec l'augmentation de la teneur en calcaire, avec une expansion maximale de 2 mm pour 25% de calcaire. Ceci pourrait indiquer une stabilité dimensionnelle légèrement affectée par des pourcentages plus élevés de calcaire.

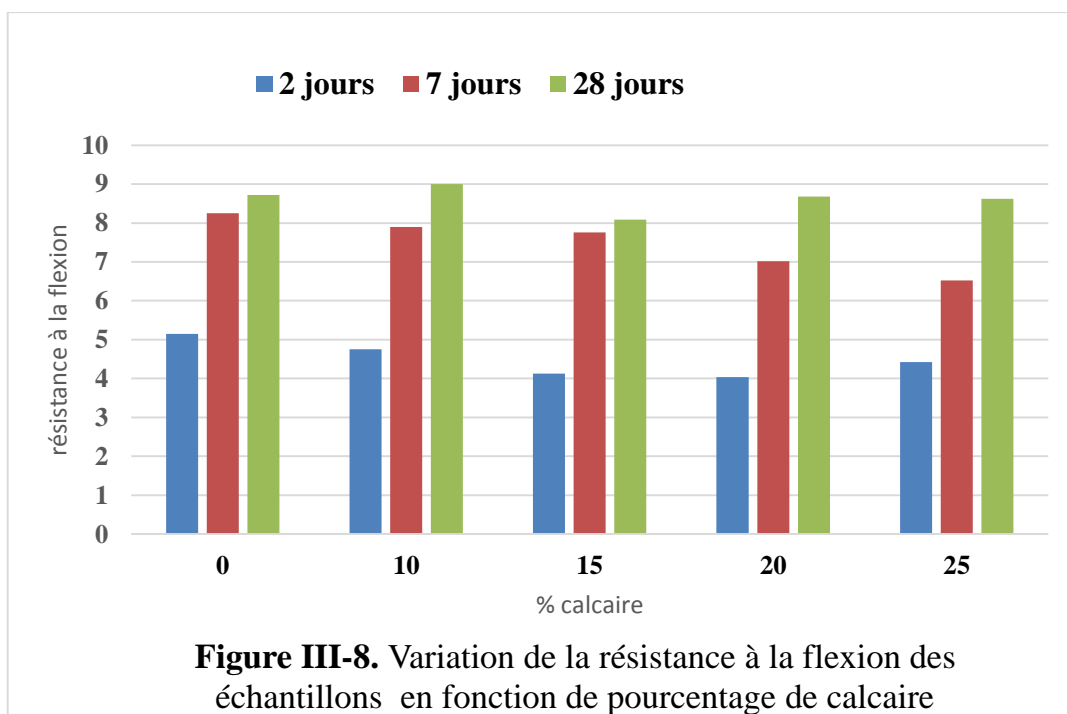
III .3. Résultats des essais mécaniques

III .3.1. Résistance à la flexion

Les résultats des résistances à la traction par flexion à 2, 7, et 28 jours est donné par le tableau suivant, selon la norme NF EN 196-1 :

Tableau 3.1. Résistance à la flexion des échantillons à différents pourcentages de calcaire

Pourcentage du Calcaire (%)	2 jours	7 jours	28 jours
Ech_0 (0% calcaire)	5.15	8.25	8.72
Ech_1 (10% calcaire)	4.75	7.90	9.00
Ech_2 (15% calcaire)	4.13	7.76	8.09
Ech_3 (20% calcaire)	4.04	7.02	8.68
Ech_4 (25% calcaire)	4.42	6.52	8.62



➤ **Interprétation**

- **Effet du calcaire à court terme :** L'ajout de calcaire tend à réduire la résistance à la flexion à 2 et 7 jours, ce qui pourrait être dû à une hydratation initiale plus lente et à une réactivité chimique réduite des particules de calcaire.
- **Effet du calcaire à long terme :** À 28 jours, la résistance à la flexion des échantillons avec 10% de calcaire dépasse légèrement celle du ciment sans calcaire, suggérant que des quantités modérées de calcaire peuvent contribuer à des résistances similaires ou légèrement supérieures à long terme. Cependant, des pourcentages plus élevés de calcaire (20% et 25%) tendent à montrer une résistance légèrement inférieure mais toujours comparable au ciment sans calcaire.

Ces résultats indiquent que l'ajout de calcaire peut affecter la résistance à la flexion à court terme, mais qu'à long terme, des ajustements dans la formulation peuvent compenser ces effets, permettant d'obtenir des résistances adéquates.

III .3.2. Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression à 2, 7, et 28 jours est donné par le tableau suivant, selon la norme NF EN 196-1 :

Tableau 3.2. Résistance à la compression des échantillons à différents pourcentages de calcaire

Pourcentage du Calcaire (%)	Résistance mécanique à la compression		
	2 jours	7 jours	28 jours
Ech_0 (0% calcaire)	22,2	50,28	66,75
Ech_1 (10% calcaire)	21,37	47,26	61,48
Ech_2 (15% calcaire)	20,53	42,15	56,59
Ech_3 (20% calcaire)	19,47	42,09	52,23
Ech_4 (25% calcaire)	18,13	37,23	45,63

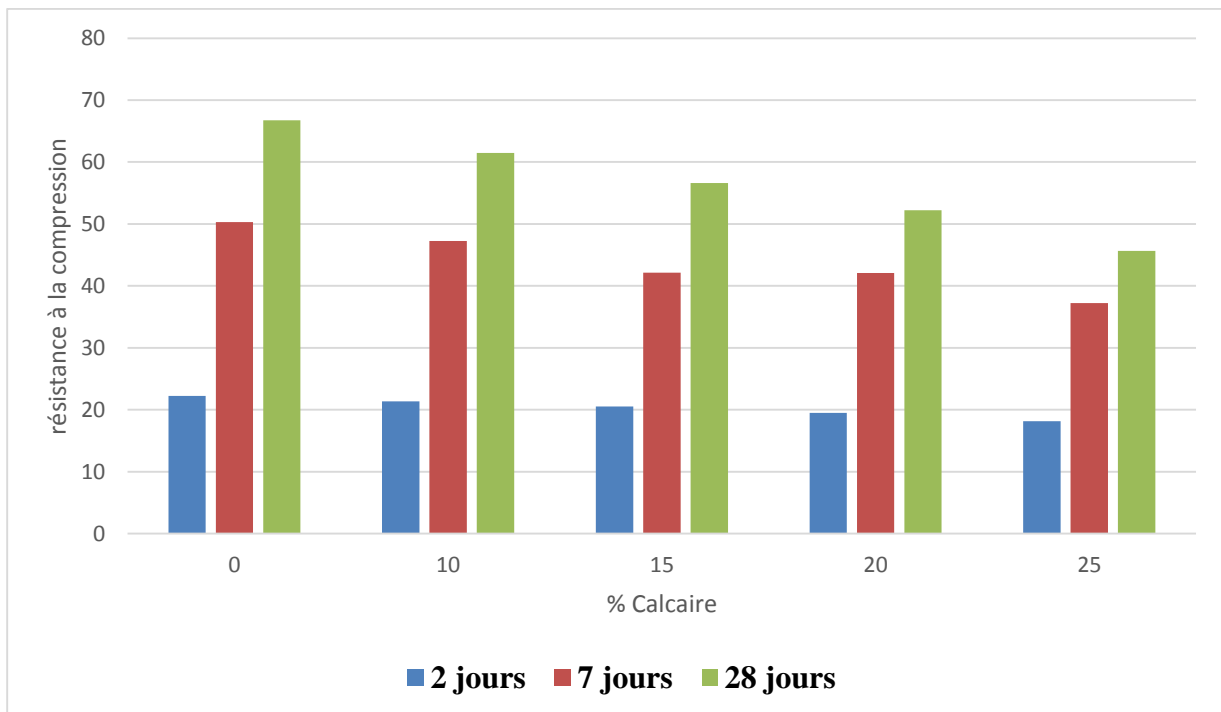


Figure III-9. Variation de la résistance à la compression des Mortiers en fonction de pourcentage de calcaire

- **Effet de l'addition de calcaire**

L'ajout de calcaire dans le ciment réduit la résistance à la compression à court, moyen et long terme. Cette réduction est due à la dilution de la phase cimentaire active, ce qui ralentit l'hydratation et la formation de produits d'hydratation contribuant à la résistance.

Ces résultats indiquent que bien que l'ajout de calcaire puisse être bénéfique pour certaines propriétés physiques comme la maniabilité et la durabilité, il est essentiel de surveiller attentivement la teneur en calcaire pour maintenir les performances mécaniques du ciment. Pour des applications structurelles, il est recommandé de limiter l'ajout de calcaire à un pourcentage qui n'affecte pas significativement la résistance à la compression nécessaire.

Conclusion

L'ajout de calcaire au ciment CPA-CEM I 52,5 engendre des variations significatives dans sa composition chimique, influençant ainsi ses propriétés mécaniques et physico-chimiques. L'analyse par fluorescence X a révélé une augmentation de CaO et une diminution des principaux oxydes tels que SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et SO_3 .

Les essais physiques, y compris la mesure de la surface spécifique Blaine et les tests de refus sur tamis, ont montré que l'ajout de calcaire augmente la surface spécifique et la granulométrie. Cette modification de la finesse favorise une hydratation plus rapide mais nécessite une gestion précise pour maintenir une bonne consistance.

Les essais de consistance, de temps de prise et d'expansion à chaud indiquent que l'ajout de calcaire affecte la consistance normale et les temps de prise, suggérant une influence sur la cinétique d'hydratation. Les résultats des essais mécaniques montrent que l'ajout de calcaire tend à réduire la résistance à la flexion et à la compression à court terme.

En conclusion, bien que l'ajout de calcaire présente des avantages potentiels pour l'amélioration des propriétés physico-chimiques et économiques du ciment, il est crucial de déterminer des proportions optimales pour équilibrer les impacts sur les performances mécaniques. Les données obtenues fournissent une base solide pour optimiser la formulation du ciment et encourager des applications industrielles tout en ouvrant des perspectives pour de futures recherches.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Lors de ce travail de recherche, nous avons utilisé le calcaire comme ajout au clinker portland avec différentes quantités. L'utilisation des ajouts est indispensable pour la fabrication de ciment. L'objectif était de voir l'effet de l'ajout du calcaire (avec les pourcentages 10, 15, 20 et 25%) sur les propriétés du ciment, notamment sa composition chimique et sa résistance mécanique à long terme.

A l'issue de ce travail, nous avons pu constater que l'ajout de calcaire au ciment CPA-CEM I 52,5 entraîne des variations significatives dans la composition chimique des échantillons traités. L'augmentation de la teneur en calcaire a conduit à une légère augmentation de la concentration du minéral CaO. Ces résultats ont été confirmés à l'aide de l'analyse par fluorescence X.

En outre, l'analyse par diffraction des rayons X a permis d'identifier les différents échantillons. Ces analyses ont montré la présence du minéral CaCO₃ dans tous les échantillons.

D'autres parts, d'après les mesures physiques relatives à la consistance normale, délais de prise, expansion à chaud et la surface spécifique de Blaine, les résultats ont montré que l'ajout du calcaire affecte ces paramètres, suggérant une influence sur la cinétique d'hydratation.

Les résultats des essais mécaniques montrent que l'ajout de calcaire tend à réduire la résistance à la flexion et à la compression à court terme. Ces résultats restent acceptables comparés au ciment d'une classe de résistance inférieur ou égale à 32.5MPa. De ce fait, et selon les normes internationales, les mesures de la résistance mécanique montrent que les propriétés du ciment sont convenables jusqu'à (25% de calcaire)

Recommandations

D'après nos résultats, nous pouvons recommander ce qui suit :

- Produire un ciment avec un taux de calcaire allant jusqu'au 25 % pour des utilisations spécifiques, vue que la région est riche en gisement de calcaire,
- L'ajout du calcaire peut rendre le ciment économique par réduction de son prix,
- L'utilisation du calcaire non cuit dans la fabrication du ciment peut réduire le taux d'émission de CO₂.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Kadri, S. Rouigueb et H. Chikh, Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf. Mémoire de master en génie industriel, Université de Tlemcen, 2017.
- [2] Lycée Adolphe Chérioux. Matériaux : le ciment. Consulté le 12 Février, 2020, sur scenari: http://lycee-cherioux.fr/Mooc/materiau/liants/~gen/liants.publi/web/co/liants_6.html.
- [3] Bernard Darbois, Walter Rothlauf, « ciment », Encyclopédie Universalise.
- [4] A. Aoumeur, R. Zeroual, Effet de la nature des sulfates sur les propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des coulis et mortiers de ciment avec et sans superplastifiant, Mémoire de master, Faculté des sciences d'ingénieurs Boumerdes, 2007.
- [5] Georges Dreux, Jean Festa « Nouveau guide de béton et de ses constituants » 8^{ème} édition Eyrolles Paris 1998.
- [6] Baron J., Olivier J.P., Weiss J.C., (1997), Les ciments courant. In "Les bétons, bases et données pour leur formulation". Edition Eyrolles – 806p.
- [7] C. Defossé, Chimie du ciment –valorisation des déchets en cimenterie. Laboratoire de chimie industrielle, FDSA, Université Libre de Bruxelles, 2004.
- [8] EN 197-1 "Ciment : Composition, spécifications et critères de conformité-partie 1 : ciments courants", 1996, 27 p .
- [9] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gllucci, K. Scrivener, "Influence of limestone on the hydration of Portland cements". Cement and Concrete Research, vol. 38, n° 6, 2008, pp. 848860.
- [10] NF P 15-317, Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer, Septembre 1995.
- [11] Fiches Techniques, Tome 1, Les constituants des bétons et des mortiers.
- [12] NF P 15-319 Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, septembre 1995.
- [13] Venuat M., (1989), La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1.
- [14] Document de LAFARGE France, effet de la nature des sulfates sur les propriétés physicomécaniques et rhéologique des coulis et mortiers de ciment avec et sans supeplastifiant, 2007.
- [15] Andriamanantsilavo.N.R ,2003 : comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation, Thèse de doctorat à l'Université de Bretagne sud

Références bibliographiques

- [16] Baron. J, Olivier. J.P et. Weiss. JC, 1996 : Chapitre 1A : Les ciments courants, Les bétons Bases et données pour leur formulation, sous la direction de Jacques. BARON, Jean-Pierre OLIVIER, Ed Eyrolles.
- [17] Groupe ciments Français 1993 : Sous la direction de J.C. Bastide, la fabrication du ciment, Ed.Eyrolles.
- [18] R. H. Bogue, chemistry of Portland cement, Rheinhold, New York, 1955
- [19] Venuat M., (1989), La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1. Caractéristiques
- [20] Taylor H. F. W., 1997. Cement Chemistry, 2^{ème} édition, Edition Thomas Telford, Londres
- [21] M. Merouane, Synthèse et caractérisation d'un ciment belitique riche en α 1-c2s et de haute réactivité hydraulique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2009.
- [22] NF EN 196-6, « Méthodes d'essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse", 1996, 17 p.
- [23] NF EN 196-3, "Méthodes d'essais – partie 3 : détermination du temps de prise et de stabilité", 1996, 13 p.
- [24] Le Chatelier, 1887. Recherches expérimentales sur la constitution des ciments hydrauliques. Suivi de Propositions données par la Faculté, Paris, 1887, 90p.
- [25] ASTM C39/C39M : Méthode standard d'essai pour la résistance à la compression des spécimens cylindriques de béton.
- [26] ASTM C78/C78M : Méthode d'essai standard pour la résistance à la flexion du béton (utilisant la poutre simple avec la charge de troisième point).
- [27] ASTM C496/C496M : Méthode standard d'essai pour fendre la résistance à la traction des spécimens cylindriques de béton.
- [28] EN 12390-6 : Essai du béton durci - Partie 6 : Résistance à la rupture en traction des éprouvettes.
- [29] Peray, K. E. (2004). *The Cement Plant Operations Handbook*. Tradeship Publications Ltd.
- [30] Hewlett, P. C. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier
- [31] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- [32] Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*. Thomas Telford.
- [33] Acker.P, Adam.M, Mamillan.M, Saulnier.J ,1998 : caractères du béton, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction Doc. C2240.
- [34] NF EN 450, "Cendres volantes pour béton-Définitions, exigences et contrôle de qualité", 1995, 20 p.

Références bibliographiques

- [35] ASTM C 618-94, " coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete", ASTM Standards, 3 p.
- [36] Manai K., Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise ès sciences appliqués, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [37] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson.
- [38] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- [39] Hewlett, P. C. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier.
- [40] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*. Longman.
- [41] B. Baroudi, M. Tahar, " Analyse des Procédés de Fabrication et des Propriétés Mécaniques du Ciment", l'Entreprise E.D.E.C, Chlef, 2017.
- [42] NF P 18-508, Addition pour béton hydraulique-Addition calcaire- spécification et critères de conformité, Juillet 1995.
- [43] NF P18-305, Béton de construction, Béton prêts à l'emploi préparé en usine, Avril 1966
- [44] NF EN 196-1, "Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : Détermination de la résistance", 1996, 31 p. m.
- [45] Institut Algérien de Normalisation (IANOR). (2000). NA 442/2000 : Ciments – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Algérie.
- [46] Institut Algérien de Normalisation (IANOR). (2013). NA 442/2013 : Ciments – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Algérie.
- [47] Bogue, R.H. (1955). *The Chemistry of Portland Cement*. Reinhold Publishing Corporation, New York.
- [48] NF P 15 433. Méthodes d'essais des ciment- Détermination du retrait et du gonflement, Février 1994.
- [49] ISO/IEC 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.
- [50] NF EN 196-2, "Méthodes d'essai des ciments - Partie 2 : analyse chimique du ciment", 2013.