

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Génie Mécaniques



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Chimique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique
Thème

Influence du degré de broyabilité du clinker sur les propriétés physico-mécaniques du ciment

Présenté Par :

- 1) Miloud Abid Ahlem
- 2) Zenasni Habiba

Devant le jury composé de :

Dr. Chouat Nadjat	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Cheriet Nour El Houda	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Pr. Serier Mohamed	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. Salah Hichem	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

Le ciment est un matériau de construction fondamental dont les propriétés physico-chimiques et mécaniques influencent directement la durabilité des ouvrages. Cette étude porte sur l'analyse de l'effet de la broyabilité du clinker sur les performances du ciment Portland, à travers l'évaluation de la finesse (refus au tamis 45 μm) à différents niveaux. Une seconde partie examine la substitution partielle du clinker par une pouzzolane naturelle jusqu'à 20 %. Les résultats obtenus montrent le maintien de résistances mécaniques conformes aux normes, tout en réduisant la teneur en clinker et les émissions de CO_2 , contribuant ainsi à un ciment plus durable et économiquement avantageux.

Mots clés : clinker, finesse, broyabilité, pouzzolane naturelle, ciment Portland, résistance mécanique, CO_2 .

ملخص

يُعدّ الإسمنت من أهم مواد البناء، حيث تؤثر خصائصه الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية بشكل مباشر في متانة المنشآت. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير قابلية طحن الكلينكر على أداء إسمنت بورتلاند من خلال دراسة تأثير النعومة (الرفض على منخل 45 ميكرون) عند مستويات مختلفة. كما تم التطرق إلى الإحلال الجزئي للكلينكر بالبوزولان الطبيعي بنسبة تصل إلى 20%. أظهرت النتائج الحفاظ على مقاومات ميكانيكية مطابقة للمعايير، مع تقليل نسبة الكلينكر وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مما يساهم في إنتاج إسمنت أكثر استدامة وفعالية اقتصادية.

الكلمات المفتاحية: الكلينكر، النعومة، قابلية الطحن، البوزولان الطبيعي، إسمنت بورتلاند، المقاومة الميكانيكية، ثاني أكسيد الكربون .

Abstract

Cement is a fundamental construction material whose physico-chemical and mechanical properties directly affect structural durability. This study investigates the influence of clinker grindability on the performance of Portland cement by analyzing the effect of fineness (45 μm sieve residue) at different levels. A second part explores the partial substitution of clinker with natural pozzolan up to 20%. The results demonstrate the maintenance of compliant mechanical strength while reducing clinker content and CO_2 emissions, contributing to a more sustainable and cost-effective cement.

Keywords : clinker, fineness, grindability, natural pozzolan, Portland cement, mechanical strength, CO_2 .

Remerciement

Nous remercions avant tout Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreur, le **Docteur Serier Mohamed** et le **Docteur Salah Hichem**, pour leur disponibilité, leur encadrement rigoureux, ainsi que pour leurs précieux conseils qui ont grandement contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à **la Cimenterie de Béni Saf** pour nous avoir accueillis dans le cadre de notre stage, et pour nous avoir offert un environnement professionnel enrichissant et formateur.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel de l'entreprise pour leur accueil chaleureux, leur aide et leur esprit de collaboration.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons une pensée particulière à nos familles et à nos proches pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants.

Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Hamdoullah,

Pour tout... pour la force dans la faiblesse, pour la patience dans l'épreuve et pour la lumière qui a guidé mes pas jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

À moi-même

Je dédie ce mémoire à moi-même, pour tous les efforts fournis et la persévérance dont j'ai fait preuve tout au long de ce parcours. Aujourd'hui, je suis fière du résultat.

À ma chère binôme et amie Habiba

Merci pour ta patience, ton sérieux et ta présence tout au long de ce parcours.
Ce travail est autant le tien que le mien

À mon amie Hadjer

Merci d'avoir toujours été là, dans les moments difficiles comme dans les moments de joie. Ton soutien et ton amitié ont été une vraie source de force pour moi.

À mon cher père

Merci pour tous tes sacrifices, ton soutien sans faille et ta confiance en moi. Tu m'as donné la force de continuer même dans les moments les plus difficiles.

À ma chère mère رَحْمَتُ اللَّهِ

À toi qui n'es plus là mais qui resteras à jamais dans mon cœur et dans mes prières.
C'est pour toi aussi que j'ai tenu bon et que je suis arrivée jusqu'ici.

À mes frères Houssem et Mohammed

Merci pour votre présence, votre amour et votre soutien. Vous avez toujours cru en moi et cela m'a donné la force d'avancer.

À toute ma famille

À chacun de vous qui, de près ou de loin, m'avez soutenue et encouragée. Ce travail est le fruit de votre amour et de votre confiance. Merci du fond du cœur.

Ahlem

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avec tout mon amour et ma reconnaissance, je dédie ce travail

A moi-même et à ma chère binôme,

À notre collaboration, à notre courage et à notre persévérance tout au long de ce parcours universitaire.

Je nous souhaite un avenir rempli de réussite, de bonheur et de succès.

À ma chère mère, Nassima

Pour ton amour inconditionnel, tes prières sincères, ton soutien indéfectible et tous les sacrifices que tu as consentis pour moi. Tu as toujours été ma source de force et de courage.

Avec toute ma gratitude, mon amour et mon profond respect.

À mon cher père, Mimoun

Pour ta force, tes précieux conseils, ton soutien constant et tous les sacrifices que tu as consentis pour mon avenir. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi.

À ma sœur et à mon frère, Fatima Zahra et Mohammed

Qui ont toujours été à mes côtés. Votre soutien, votre affection et votre présence ont été une source de force et d'encouragement tout au long de mon parcours. Je vous remercie sincèrement pour votre accompagnement constant et pour tout ce que vous m'apportez au quotidien.

À mon cher oncle, Boucif

Merci pour ton soutien et ton accompagnement pas à pas tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour tous tes conseils et orientations qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Avec toute ma gratitude et mon profond respect.

À ma famille,

Qui m'a toujours soutenue avec amour et encouragement. Votre présence, votre confiance et votre aide m'ont permis d'avancer et de persévérer malgré les difficultés.

Merci infiniment pour votre soutien et votre affection.

À mon amie, Hadjer

Pour ton amitié sincère, ta fidélité et ton soutien constant. Merci d'avoir été à mes côtés dans les moments de faiblesse comme dans les moments de force, et de m'avoir toujours apporté réconfort, encouragement et confiance.

Habiba

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des symboles et abréviations.....	vii
Introduction générale.....	1

Chapitre I :Études bibliographiques

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Classification des ciments portland	4
I.4 Principaux procédés et méthodes de fabrication de ciment	5
I.4.1 Principe de fabrication.....	5
I.4.2 Procédés et technique de fabrication	5
I.4.3 La fabrication des ciments portland.....	6
I.5. Constituants de base du ciment	13
I.5.1 Matières premières	13
I.5.2 Matériaux de correction.....	14
I.5.3 Les Matières secondaires.....	16
I.6 Le clinker.....	18
I.6.1 Définition de clinkérisation	18
I.6.2 Composition chimique du clinker.....	19
I.6.3 Composition minéralogique de clinker.....	19
I.7 Broyage de clinker.....	20
I.7.1 La broyabilité de clinker.....	20
I.8 Conclusion.....	21

Chapitre II :Matériaux utilisés et essais réalisés

II.1 Introduction	23
II.2 Objectif de travail.....	23
II.3 Protocole de préparation des échantillons de ciment	23
II.3.1 Matériau d'étude (Le ciment).....	23
II.3.2 Echantillon de départ.....	23
II.3.3 Division et préparation des échantillons	24
II.3.4 Protocole de broyage progressif.....	24
II.3.5 Mesure des refus au tamis de 45 µm.....	25

II.4 Analyses chimiques.....	26
II.4.1 Détermination de la silice (SiO_2)	28
II.4.2 Dosage des oxydes par complexométrie	29
II.4.3 Détermination de la chaux libre CaO_L	32
II.4.4 Détermination de la perte au feu (PAF).....	33
II.4.5 Détermination du pourcentage de SO_3	34
II.4.6 Détermination des résidus insolubles	34
II.5 Analyse par fluorescence des rayons X (XRF)	35
II.6 Méthodes physiques	36
II.6.1 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine	37
II.6.2 Mesure de la densité.....	38
II.6.3 La consistance normale	39
II.6.4 Essais de prise	42
II.6.5 Essai d'expansion.....	43
II.7 Essais de Résistance Mécanique (Flexion et Compression)	45
II.7.1 Objectif de l'essai	45
II.7.2 Équipement et Consommables	45
II.7.3 Préparation du Mortier Normalisé.....	46
II.7.4 Réalisation des Essais de Rupture	47
II.7.5 Expression des Résultats	48
II.8 Conclusion.....	49

Chapitre III :Résultats et discussion

III.1 Introduction.....	51
III.2 Analyse chimiques des constituants du ciment.....	51
III.2.1 La composition chimique de gypse.....	51
III.2.2 La composition chimique de pouzzolane.....	51
III.2.3 La composition chimique de clinker	51
III.2.4 La composition minéralogique de clinker.....	51
III.3 Caractérisation du Ciment à(8% d'Ajout Pouzzolane (étude 01))	52
III.3.1-Refus par tamisage.....	52
III.3.2 Résultats d'analyse chimique des échantillons	54
III.3.3 Analyse Chimiques Par fluorescence des RX.....	55
III.3.4 Résultats des essais physiques	56
III.3.5 Résultats des essais mécaniques	58
III.4 Impact de la granulométrie sur le ciment (8 % de pouzzolane).....	61

III.5 Conclusion	61
Chapitre IV :Etude Complémentaire	
IV.1 Optimisation par Ajout de Pouzzolane (Échantillons EP3 et EP5).....	63
IV.1.1 Objectif de l'étude	63
IV.1.2 Justification du choix des échantillons.....	63
IV.1.3 Procédure de préparation.....	63
IV.2. Résultats sur un ciment avec (20 % d'ajout pouzzolane)	65
IV.2.1 Objectif de l'Étude Complémentaire	65
IV.2.2 Analyse de la Finesse	65
IV.2.3. Résultats d'analyse chimique	65
IV.2.4 Analyse Par fluorescence des RX	67
IV.2.5 Résultats des essais mécaniques.....	68
IV.2.6 Conclusion.....	70
IV.3 Estimation de l'impact économique et environnemental de l'optimisation du taux d'ajout.	71
IV.3.1 Conclusion.....	72
Conclusion Générale.....	73
Références.....	75
Annexes	81
ANNEX01	82
ANNEX02	83
ANNEX03	84

Liste des figures

Figure	Page
Figure I.1. Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment Portland	06
Figure I.2. Gisement calcaire et argile.	07
Figure I.3. Le concasseur	07
Figure I.4. Le polaire à l'intérieur	08
Figure I.5. Le hall de pré-homogénéisation	08
Figure I.6. Broyeur cru	09
Figure I.7. Silos d'homogénéisation.	09
Figure I.8. La tour de préchauffage	10
Figure I.9. Four rotatif	10
Figure I.10. Le refroidisseur	11
Figure I.11. Broyeur ciment	11
Figure I.12. Silos de stockage de ciment.	12
Figure I.13. Calcaire	13
Figure I.14. Argile	14
Figure I.15. Minerai de fer	14
Figure I.16. Le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	15
Figure I.17. Sable	15
Figure I.18. Pouzzolane	16
Figure I.19. Clinker	18
Figure I.20. Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés.	20
Figure II.1. Echantillon de départ	24
Figure II.2. Broyage de ciment	25
Figure II.3. Matériel d'essai refus EN 196-6 /NA 443	25
Figure II.4. Opération de tamisage du ciment sur le tamis de $45 \mu\text{m}$	26
Figure II.5. Attaque acide des échantillons de ciment	27
Figure II.6. Évaporation de la solution sur bain de sable	27
Figure II.7. Reprise de la solution avec HCl concentré et eau distillée	27
Figure II.8. Mise en ébullition de la solution	28
Figure II.9. Détermination de la silice (SiO_2)	28
Figure II.10. Détermination de l'oxyde de magnésium (MgO)	30
Figure II.11. Détermination de l'oxyde du fer Fe_2O_3	31
Figure II.12. Détermination de l'oxyde d'alumine Al_2O_3	32
Figure II.13. Détermination de la chaux libre CaOL	33
Figure II.14. Détermination de la perte au feu (PAF)	33
Figure II.15. Détermination du pourcentage de SO_3	34
Figure II.16. Détermination des résidus insolubles EN 196-2	35
Figure II.17. Analyse des pastilles par fluorescence des RX	36
Figure II.18. Machine de préparation des perles	36
Figure II.19. Le perméabilimètre de Blaine	38
Figure II.20. Mesure de la densité	39

Figure II.21. L'appareil Vicat	40
Figure II.22. Le malaxeur	40
Figure II.23. Moule tronconique remplis de pâte	41
Figure II.24. Mesuré de la consistance normale	41
Figure II.25. Appareil de Vicat	42
Figure II.26. Moule tronconique	42
Figure II.27. Plaque De base	43
Figure II.28. Moule Le Chatelier remplie mesure L1	44
Figure II.29. Placer l'ensemble dans l'armoire humide	44
Figure II.30. Immerger le moule dans le bain-marie	45
Figure II.31. Mesurer l'écartement final L2	45
Figure II.32. Équipement pour préparation du Mortier	46
Figure II.33. Malaxage	46
Figure II.34. Mise en moule et Compactage	47
Figure II.35. Conservation	47
Figure II.36. Machine d'essai mécanique	47
Figure II.37. Essai de Flexion	48
Figure II.38. Essai de Compression	48
Figure III.1. La composition minéralogique du clinker	52
Figure III.2. Echantillon en fonction de refus	53
Figure III.3. La perte au feu en fonction du taux de refus	54
Figure III.4: La surface spécifique du Blaine par rapport au refus	56
Figure III.5. Variation de la densité en fonction du refus	57
Figure III.6. Evolution du temps de prise en fonction du refus	58
Figure III.7. Résistance à la flexion en fonction de refus	59
Figure III.8. Variation de la résistance à la compression en fonction du refus	60
Figure IV.1. Pouzzolane broyée	64
Figure IV.2. Ciment à 20% de Pouzzolane	64
Figure IV.3. Pert au feu des échantillons E3, EP3 et E5, EP5.	66
Figure IV.4. Résidue insoluble des échantillons E3 ,EP3 et E5 ,EP5 .	67
Figure IV.5. Comparaison des résistances à la flexion des échantillons E3 ,EP3 et E5 ,EP5 .	69
Figure IV.6. Comparaison des résistances à la Compression des échantillons E3,EP3 et E5,EP5	70

Liste des tableaux

Tableaux	Pages
Tableau I.1. Classification du ciment portland selon l'Association canadienne de normalisation (CSA).	04
Tableau I.2. Classification du ciment portland selon norme ASTM C 150.	04
Tableau I.3. Procédés généraux de fabrication du ciment.	06
Tableau I.4. Composition chimique élémentaire de gypse de Béni-Saf	15
Tableau I.5. Composition chimique de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.	16
Tableau I.6. Composition chimique du laitier granulé.	17
Tableau I.7. Les compositions chimiques de clinker	19
Tableau I.8. Composition minéralogique de clinker	19
Tableau II.1. Matrice de préparation et objectifs de finesse	24
Tableau III.1. La composition chimique de gypse	51
Tableau III.2. La composition chimique de pouzzolane	51
Tableau III.3. La composition chimique du clinker	51
Tableau III.4. La composition minéralogique du clinker.	52
Tableau III.5. Synthèse des refus mesurés sur les échantillons préparés	53
Tableau III.6. Résultats de la perte au feu (PF)	54
Tableau III.7. Résultat de Résidu insoluble	55
Tableau III.8. Analyses par fluorescence de RX des échantillons de ciment	55
Tableau III.9. Résultats de l'essai de Blaine des différents échantillons de ciment	56
Tableau III.10. Résultats de la densité des différents échantillons de ciment	57
Tableau III.11. Résultat La consistance normale, temps de début et fin de prise et expansion	58
Tableau III.12. Résultats de la résistance à la flexion	59
Tableau III.13. Résultats des résistances mécaniques des échantillons de ciment	60
Tableau IV.1. Synthèse des refus mesurés sur les échantillons préparés	65
Tableau IV.2. Perte au Feu (PF)	66
Tableau IV.3. Résultats de le Résidue insoluble	67
Tableau IV.4. Les analyses chimiques par fluorescence de RX	68
Tableau IV.5. Résistances à la flexion des échantillons Ep3,Ep5 Par rapport à E3 et E5	68
Tableau IV.6. Résistances mécaniques des échantillons EP3 et EP5	70
Tableau IV.7. Comparaison entre la situation actuelle et une situation optimisée basée sur une augmentation du taux d'ajout	72

Liste des symboles et abréviations

CSA	Association canadienne de normalisation.
C3S	Silicate tricalcique.
C2S	Silicate bicalcique
C3A	Aluminate tricalcique
C4AF	Ferro-aluminate tétracalcique
C-S-H	Silicate de calcium hydrate
CaCO₃	Carbonate de calcium
MgCO₃	Carbonate de magnésium
CaSO₄·2H₂O	Gypse
SSB	Surface spécifique Blaine
Mm	Micromètre
P	Masse volumique
C°	Degré Celsius (Température)
T	Tonne
XRF	Fluorescence X
EDTA	Acide éthylène diamine tétra acétique
PAF	Perte au feu
RI	Résidus insoluble
N/10, N/2	Normalité
MPa	Mégapascal
E/C	Rapport eau/ciment
HR	Humidité relative
Comp	Compression
Rc	Résistance à la compression
ASTM C150	Norme américaine du ciment
CEM II/A-P 42.5N	Type de ciment
ISO	Organisation internationale de normalisation

EN	Norme européenne
NA	Norme algérienne
CP	Ciment portland
R	Résistance
Q	Chaleur



Introduction Générale

Introduction générale

Le ciment constitue l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde en raison de son rôle essentiel dans la fabrication du béton et des mortiers.

La performance et la durabilité des ouvrages réalisés à partir de ces matériaux dépendent en grande partie des propriétés physico-mécaniques, notamment de ses résistances mécaniques, c'est-à-dire sa capacité à devenir dur et à supporter des efforts.

Ces résistances se développent lorsque le ciment réagit avec l'eau, formant des produits hydratés qui lient les particules entre elles et rendent la structure solide.

Le développement de ces résistances dépend de plusieurs facteurs liés à la composition et à la fabrication du ciment. Parmi eux, on trouve :

- La composition chimique et minéralogique du clinker.
- La nature et la proportion des ajouts minéraux (calcaire, pouzzolane, laitier,).
- La teneur en gypse.
- La finesse du ciment.

Le processus de mouture, en définissant la finesse du ciment, constitue un levier de contrôle majeur de sa réactivité. En augmentant la surface spécifique des particules, on accélère la cinétique d'hydratation, favorisant ainsi l'acquisition des résistances mécaniques aux jeunes âges. Néanmoins, une finesse excessive peut induire une augmentation de la demande en eau de gâchage et une accélération du temps de prise.

Dans cette optique, ce travail se propose d'analyser l'influence de la finesse de broyage sur les propriétés physico-mécaniques d'un ciment **CEM II/A-P 42.5 N**. L'objectif est de quantifier l'impact de la granulométrie sur le développement des performances mécaniques afin de définir un compromis optimal entre la qualité du produit fini et les contraintes de production industrielle.

Ce mémoire s'articule en **quatre chapitres complémentaires** : le premier est consacré à une étude bibliographique du ciment, abordant son historique, sa classification, ses procédés de fabrication ainsi que ses principaux composants, notamment le clinker et sa broyabilité ; le deuxième chapitre présente l'étude expérimentale, détaillant les méthodes d'analyse chimique et les essais physico-mécaniques réalisés ; le troisième chapitre expose les résultats obtenus ainsi que leur interprétation, permettant une meilleure compréhension des propriétés du ciment étudié ; enfin, le quatrième chapitre constitue une étude complémentaire portant sur l'ajout de pouzzolane à différents taux allant jusqu'à 20% en substitution partielle du clinker, tout en évaluant l'impact économique et environnemental de cette optimisation en termes de réduction des coûts de production et des émissions de CO₂.

Chapitre I :

Études bibliographies

I.1 Introduction

Le ciment est un liant hydraulique, décrit comme une substance minérale finement broyée de teinte grise qui, lorsqu'il est combiné à l'eau de gâchage, génère une pâte qui peut se solidifier et durcir grâce à des réactions et processus d'hydratation, tout en maintenant sa force et sa stabilité même en milieu aquatique [1][2]. L'origine du mot « ciment » remonte au latin coementum, qui signifie mortier ou liant pour les maçonneries. Ce sens initial s'est progressivement concentré sur les liants hydrauliques dont le durcissement provient des réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de la chaux [1].

En termes de production, les ciments standard sont fabriqués grâce à un mélange de près de 75 % de calcaire et 25 % d'argile, chauffé progressivement jusqu'à atteindre environ 1450 °C puis soudainement refroidi ; au cours de ces processus thermiques, plusieurs réactions chimiques se produisent pour former le clinker un agrégat granulaire principalement composé de chaux, silice, alumine et oxyde de fer qui lorsqu'il est associé à du gypse et éventuellement d'autres ajouts avant d'être minutieusement broyé, se transforme en ciment .[3][2]

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue la bibliographie sur le ciment et le clinker, ainsi que les étapes de la fabrication du ciment et la composition minéralogique de clinker.

I.2 Historique

Dans la préhistoire et au début l'antiquité les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélagiques de Grèce ou les murs incas. A Babylone, les maçonneries de briques étaient liées au bitume. Les Egyptiens utilisèrent pour les pyramides, notamment, un plâtre grossier produit par cuisson d'un gypse (sulfate de calcium) impur. L'es Grecs furent parmi les premiers constructeurs employant la chaux obtenue par cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le 1er siècle avant J.-C En l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendres volcaniques actives, soit artificielles comme les briques pilées, ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Celui-ci permit de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports. Aucun progrès ne fut accompli sur les liants pendant le moyen Age, dont les principales constructions-cathédrales-doivent leur réussite surtout aux progrès réalisés dans l'art de tailler et d'assembler les pierres.[4]

Ce n'est que lors du XVIIIe siècle que des ingénieurs européens ont réexaminé les caractéristiques hydrauliques de certaines chaux. En 1756, l'ingénieur britannique John Smeaton a remarqué que les calcaires argileux chauffés produisent un liant qui durcit dans l'eau, caractéristique qu'il a utilisée pour la construction du phare d'Eddystone.[5]

En France, Louis Vicat contribua de manière décisive à la compréhension scientifique des liants hydrauliques dès 1818, en établissant les bases théoriques de la prise hydraulique et en démontrant le rôle de la silice dans la formation des liants.[5]

En 1824, l'Anglais Aspdin prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de portland mais celui-là comportait encore beaucoup de points obscurs, C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit. A la fin du XIXe siècle, en France, le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'américain Bague au XXe siècle. [4]

En 1890 on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : le ciment alumineux fut découvert par Bied, en 1908.[4]

En Algérie, l'industrie cimentière a connu un développement significatif à partir des années 1970, avec la création du Groupe GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie), qui regroupe aujourd'hui plusieurs cimenteries réparties sur le territoire national. La production nationale dépasse actuellement 25 millions de tonnes par an, couvrant en grande partie les besoins du secteur de la construction.[6]

I.3 Classification des ciments portland

On fabrique plusieurs ciments portland possédant différentes caractéristiques physiques et chimiques et répondant à des besoins précis. L'association canadienne de normalisation (CSA) divise les différents types de ciment Portland en cinq catégories la composition typique des ciments de chaque catégorie est donnée au tableau 1 [7]

Tableau I.1. Classification du ciment portland selon l'Association canadienne de normalisation (CSA). [7]

Type	Caractéristique	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Type 10	CP normal	50	24	11	8
Type 20	CP à Q modérée	42	33	5	13
Type 30	CP à haute R initiale	60	13	9	8
Type 40	CP à faible Q d'hydratation	26	50	5	12
Type 50	CP résistant aux sulfates	40	40	3 5	9
CP ciment portland		R résistance		Q chaleur	

Les ciments portland spécifiés et utilisés aux États-Unis sont normalement conformes à ASTM C 150, Standard Specification for Portland Cement, La norme ASTM est de loin la plus utilisée dans le domaine du ciment et du béton. La norme ASTM C 1157, Performance Specification for Hydraulic Cements, établit six types de ciment portland [7]

La norme ASTM C 150 établit les huit types de ciment portland suivants, qu'elle désigne au moyen de chiffres romains :

Tableau I.2. Classification du ciment portland selon norme ASTM C 150[7]

Type I	Normal
Type IA	Normal, à air entraîné
Type II	À résistance moyenne aux sulfates
Type IIA	À résistance moyenne aux sulfates, à air entraîné
Type III	À haute résistance initiale
Type IIIA	À haute résistance initiale, à air entraîné
Type IV	À faible chaleur d'hydratation
Type V	À haute résistance aux sulfates

I.4 Principaux procédés et méthodes de fabrication de ciment

I.4.1 Principe de fabrication

Le ciment est produit à partir des roches facilement accessibles : calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant environ 75% de calcaire et 25% d'argile. Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin de clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5%) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise. A ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau, le calcaire, les cendres volantes.[8]

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru.
- Cuisson.
- Broyage et conditionnement. [9]

I.4.2 Procédés et technique de fabrication

La fabrication du ciment nécessite la combinaison de quatre composants majeurs en proportions spécifiques : la chaux (65%), la silice (20%), l'alumine (10%) et l'oxyde de fer (5%). L'élément dominant dans ce cas est le calcaire ou la craie. D'ailleurs, les usines de ciment sont situées près de gisements significatifs de ces matériaux.

L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité en installations procédant par quatre méthodes de fabrication suivant la teneur en eau du calcaire ou de la craie.[10]

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (dérivée de la voie humide)
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée)
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (dérivée de la voie sèche).

I.4.2.1 Fabrication du ciment par voie humide

Le cru est transformé en une pâte fluide par adjonction d'eau (entre 30 et 40% d'eau) avant d'entrer dans le four, il s'agit de la technique la plus simple mais aussi de la plus consommatrice en énergie puisqu'il faut évaporer l'eau lors de la cuisson.[8]

I.4.2.2 Fabrication du ciment par voie semi-humide et semi-sèche

La voie semi-humide est une alternative à la voie humide où la boue est préalablement filtrée pour obtenir des « galettes » avant la cuisson, diminuant ainsi sa teneur en eau à 17-22 %. En ce qui concerne la voie semi-sèche, elle consiste à partir d'une farine sèche que l'on hydrate légèrement pour créer des granules avant de les introduire dans le four. Ces deux procédés présentent des usages thermiques intermédiaires et sont principalement trouvées dans les installations plus anciennes.[11]

I.4.2.3 Fabrication du ciment par voie sèche :

Le cru est séché puis broyé. Il est ensuite homogénéisé dans de grands silos. Il est enfin introduit sous forme pulvérulente dans une tour de préchauffage où la décarbonatation se déroule partiellement, avant d'entrer dans le four proprement dit.[12]

Le tableau ci-dessous présente les opérations communes aux quatre procédés

Tableau I.3. Procédés généraux de fabrication du ciment. [9]

Opérations communes aux quatre procédés Extraction en carrière : calcaire, argile Concassage et transport	
Voie humide Délaiage + broyage Dosage Stockage Four Voie Semi-humide Filtration Boudinage Four	Voie sèche Pré homogénéisation Broyage + séchage Homogénéisation Four Voie semi-sèche Granulation Four
Opérations communes aux quatre procédés Broyage Gypse + ajouts (pouzzolane, laitier...) Stockage Expéditions	

Nous allons par la suite parler la voie sèche car c'est la voie la plus utilisée dans l'usine et la plus économique.

I.4.3 La fabrication des ciments portland

Le constituant principal des ciments est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de 75% de calcaire et 25% d'argile.

Les principales étapes de la fabrication du ciment sont la préparation du cru (composition et mélange des matières premières), la transformation de celui-ci par procédé de cuisson, et la transformation du produit de la cuisson (le clinker) en ciment.[1]

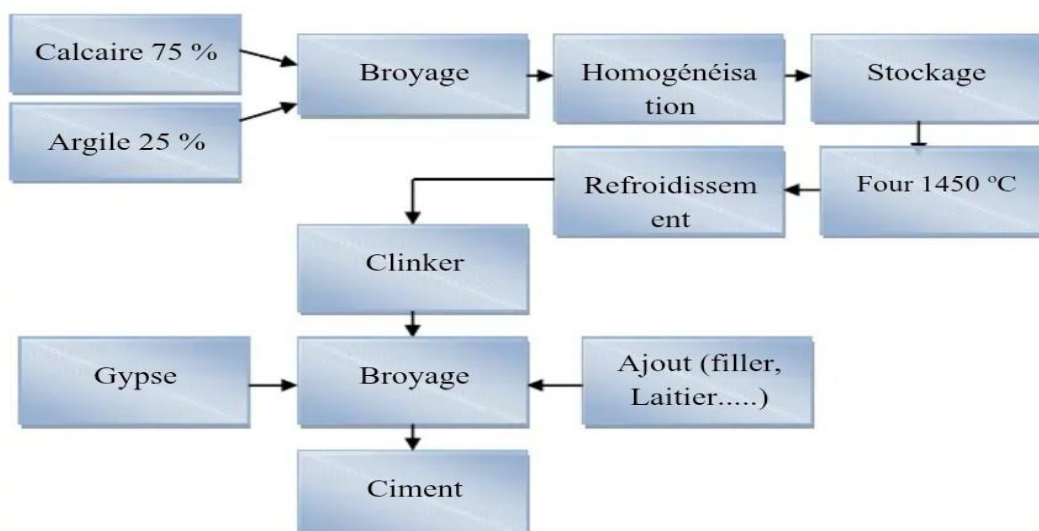


Figure I.1. Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment Portland [13]

I.4.3.1 Extraction

Le calcaire est extrait par explosif dans des carrières généralement proches ou près de la cimenterie. L'argile, plus meuble, est extraite par des engins mécaniques et transportée en cimenterie.[14]



Figure I.2. Gisement calcaire et argile. [15]

I.4.3.2 Concassage

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur.

Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté.

Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile. [16]

- Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasif mais non collants. Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.
- Le concasseur giratoire.
- Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).
- Le concasseur à marteaux pour les matériaux friables à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de (10 à 20). [16]

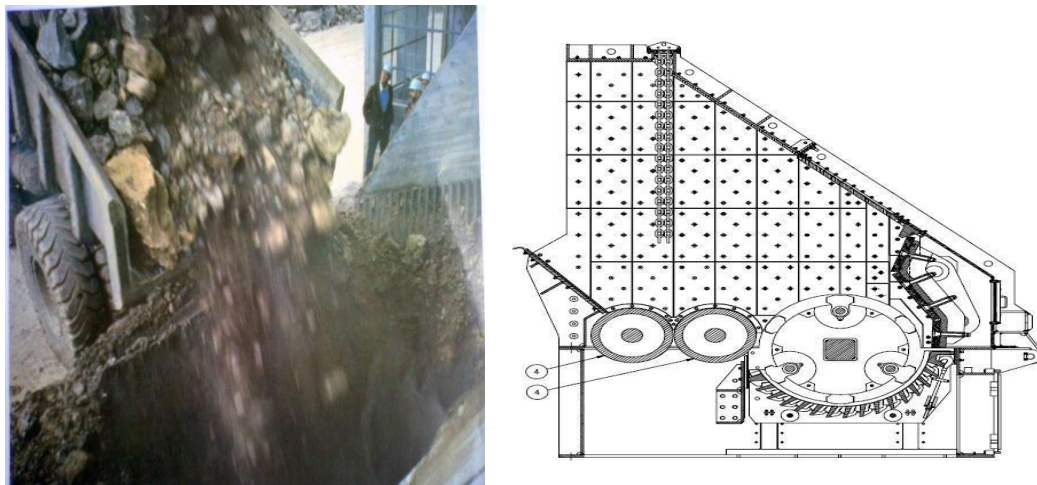


Figure I.3.Le concasseur

I.4.3.3 Le Stockage de matière première

Après l'opération de concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm, les constituant sont acheminés vers le stock primaire (hall de stockage) par des tapis roulant couverts, pour le pré homogénéisation : un hall avec un stockage circulaire pour le calcaire et un hall a stockage linéaire pour l'argile et le sable et minerais de fer.[8]



Figure I.4. Le polaire à l'intérieur

I.4.3.4 Pré homogénéisation

La farine crue est très largement brassée dans des silos d'homogénéisation, de manière à obtenir une composition chimique et physique ciblée, la plus régulière possible.[16]



Figure I.5. Le hall de pré-homogénéisation

I.4.3.5 Broyage du cru

Le broyage du cru est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. le broyeur

est constitué de deux paires de galets à suspension flottante, ces paires de galets sont entraînées par un plateau de broyage, sous l'effet de la force centrifuge, la matière passe sous les galets, alors que les particules trop lourdes retombent sous le plateau de broyage dans un élévateur à godets qui les recycle dans le broyeur, les particules fines entraînées par le flux de gaz, sont dirigées vers le séparateur monté sur le broyeur, la pression des galets est fournie par un système de vérins hydrauliques.[17]



Figure I.6. Broyeur cru [15]

I.4.3.6 Homogénéisation

La farine crue est homogénéisée dans deux silos d'une capacité unitaire de 10000 T. Pour augmenter l'efficacité de l'homogénéisation les deux silos sont alimentés et soutirés simultanément. La méthode généralement utilisée pour l'homogénéisation est envoi de l'air en bas de silos permettant de fluidifier la farine.[8]



Figure I.7. Silos d'homogénéisation. [15]

I.4.3.7 Cuisson

La cuisson est une opération très consommatrice d'énergie. Elle se fait à une température au voisinage de 1450 C°. Elle permet aux constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) de se combiner avec la chaux existant dans le calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux. [18]

Le cycle du traitement comportant les phases suivantes : [19]

- ✚ 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.

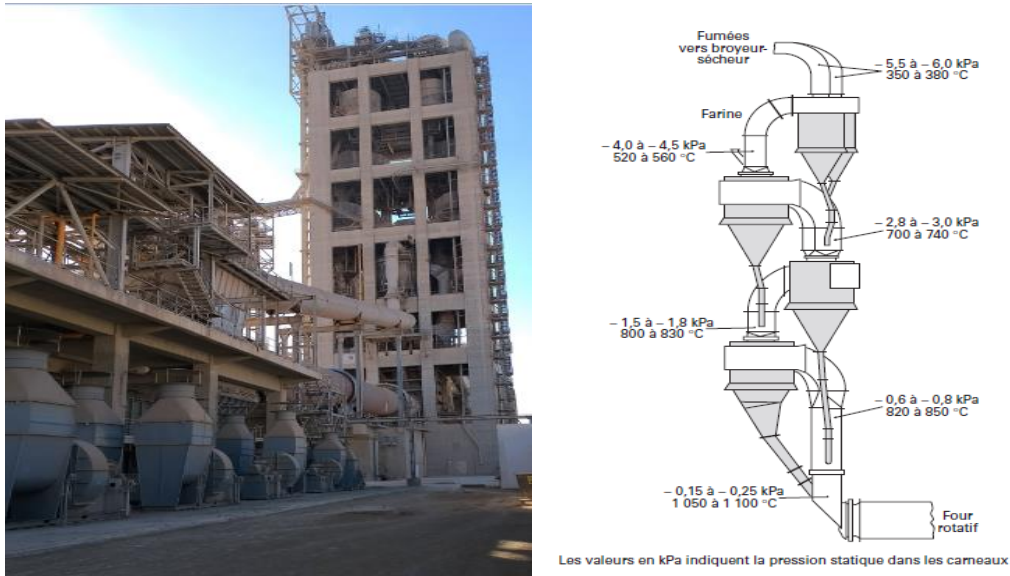


Figure I.8. La tour de préchauffage

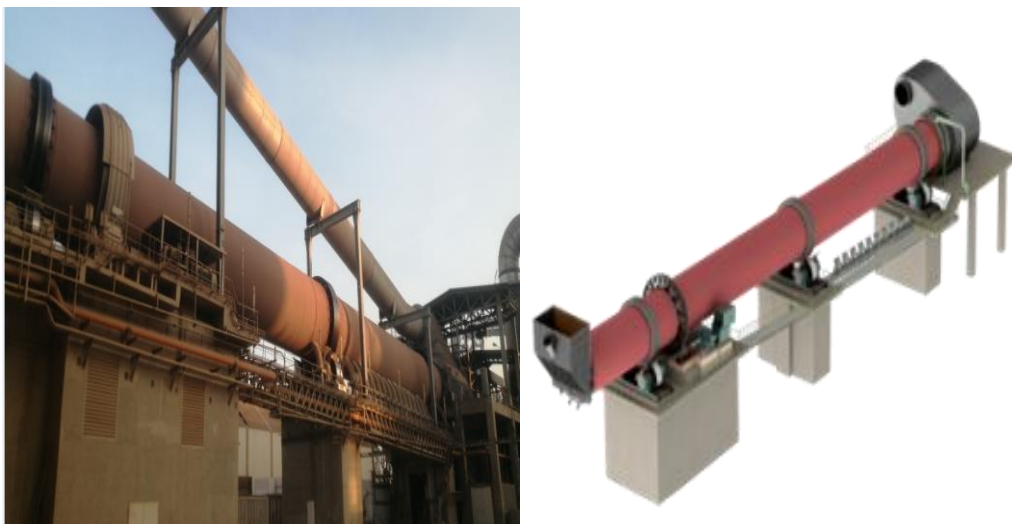


Figure I.9. Four rotatif

I.4.3.8 Refroidissement

Situé à l'aval du four, a un triple rôle :

- a) Refroidir le clinker qui sort du four à une température de 160°C par soufflage d'air au travers des plaques des grilles.
- b) Récupérer le maximum de chaleur contenu dans le clinker.

- c) Assurer la trempe de clinker par un refroidissement énergétique et rapide afin de stabiliser ses phases minérales. [16]

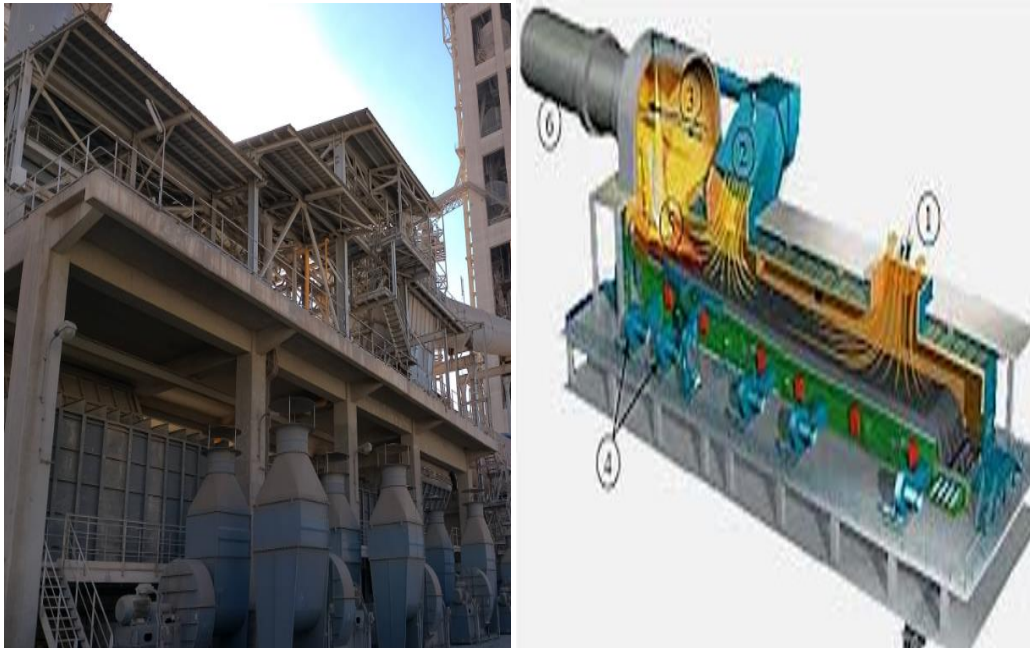


Figure I.10. Le refroidisseur

I.4.3.9 Stockage du clinker

Le clinker se présente sous la forme de granules de la grosseur d'une noisette. Il est stocké dans des silos à clinker en attendant d'être broyer pour faire de ciment.[9]

I.4.3.10 Broyage clinker

Il est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise. Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tel que le laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment.[20]

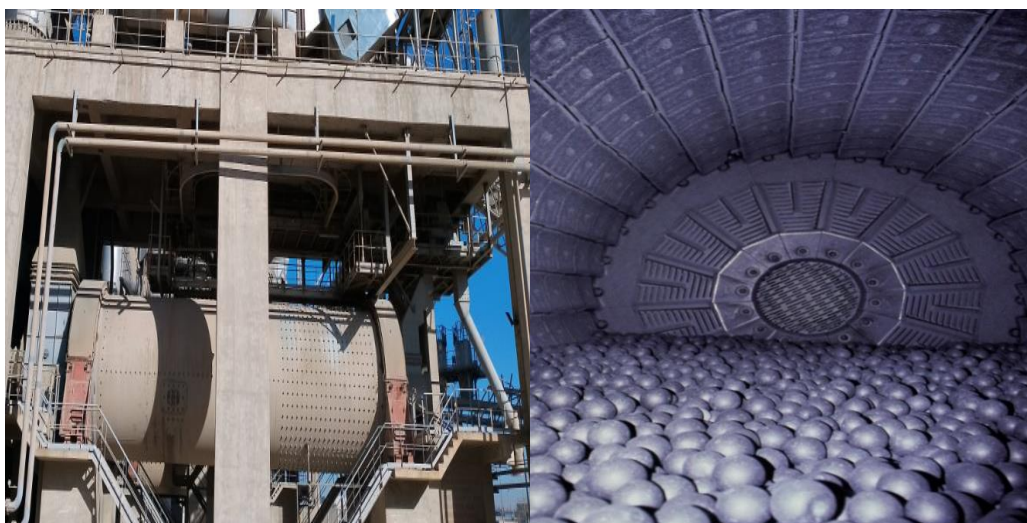


Figure I.11. Broyeur ciment

I.4.3.11 Stockage, Ensachage et Expédition du ciment

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac.[19]



Figure I.12. Silos de stockage de ciment. [15]

I.4.3.12 Laboratoire de contrôle

Le laboratoire de contrôle dans l'industrie du ciment possède un rôle important et indispensable. C'est des contrôles effectués à chaque étape du processus de fabrication que dépend la qualité recherchée du ciment. En effet, le prélèvement continu des échantillons permet aux chimistes de contrôler régulièrement le respect des valeurs limites dans les matières premières et les combustibles. Les essais sont donc réalisés tant sur les produits semi-finis ou finis (analyse chimique et minéralogique), que sur les mortiers pour en vérifier les caractéristiques (prise, résistance mécanique). [12]

Afin de garantir la qualité du produit fini il est indispensable d'effectuer des prises d'échantillons tout le long de la ligne de production comme il est mentionné ci-dessous :

- ✚ Sortie concasseur ou alimentation tas de pré- homogénéisation au niveau du hall de stockage (mélange calcaire +argile).
- ✚ Entrée broyeur cru (mélange : calcaire, argile et ajout) : analyseur en ligne ou prélèvement manuel.
- ✚ Sortie broyeur (farine) : échantillonneur automatique ou prélèvement manuel.
- ✚ Sortie silo d'homogénéisation (farine) : prélèvement manuel.
- ✚ Entrée four (farine) : échantillonneur automatique ou prélèvement manuel.
- ✚ Sortie refroidisseur (clinker) : prélèvement manuel.
- ✚ Sortie broyeur ciment (ciment) : échantillonneur automatique ou prélèvement manuel.
- ✚ Sortie silo de stockage du ciment : prélèvement manuel.
- ✚ L'ensemble des ajouts (Minerai de fer, sable, calcaire pur, gypse, pouzzolane...) sont analysé par des prélèvements manuels.

I.5. Constituants de base du ciment

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques renfermant chaux, silice, alumine et fer. En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter, et combiner. On peut utiliser aussi comme appoint des sous-produits d'autres industries tels le laitier de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques.[4]

I.5.1 Matières premières

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont le calcaire et l'argile à des proportions variées.[21]

I.5.1.1 Le calcaire

Le calcaire, principale matière première de la fabrication du ciment, est extrait en carrière et peut représenter jusqu'à 75 % de la masse totale du mélange cru les calcaires peuvent être de pureté et de duretés variables. [22]

Est une roche sédimentaire carbonatée composée d'au moins 50 % de calcite (CaCO_3), pouvant contenir également de la dolomite et de l'aragonite. Sa formation résulte soit de l'accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires coraux, bivalves, foraminifères, soit de la précipitation chimique ou biochimique de carbonates de calcium. [23]



Figure I.13. Calcaire [24]

➤ On classe les calcaires comme suit :

1. Calcaire dur : On attribue ce nom au calcaire contenant un minimum 80 % de CaCO_3 et un maximum de 5 % de MgCO_3 . Les calcaires durs sont imperméables à l'eau. [9]

2. Calcaire mou (craie) : Le calcaire mou contient un maximum de 90 % en CaCO_3 . Les calcaires mous sont perméables à l'eau, et poreux.[9]

I.5.1.2 Argile

L'argile recouvre toutes les petites particules formées par les processus d'érosion ou d'altération des roches, c'est-à-dire aussi bien du sable (SiO_2), des oxydes (comme l'oxyde ferrique Fe_2O_3 qui donne

la couleur rouge à certains sols), des carbonates comme la calcite, que tout autre minérale. Les argiles sont de bons catalyseurs.[21]



Figure I.14. Argile [24]

I.5.2 Matériaux de correction

I.5.2.1 Minerai de fer

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme la bauxite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.[25]



Figure I.15. Minerai de fer [24]

I.5.2.2 Le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche. Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre. Il entre aussi dans la composition des ciments.[22]



Figure I.16. Le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [24]

Tableau I.4. Composition chimique élémentaire de gypse de Béni-Saf. [26]

Composant	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	PAF
%	0.00	0.4	1.19	5.37	38.50	0.11	32.08	0.66	18.20

I.5.2.3 Bauxite

La bauxite, minéral naturel utilisé pour produire l'aluminium, et l'un des éléments métalliques les plus abondants de la croûte terrestre. La bauxite extraite est transformée par affinage en alumine, qui est ensuite transformée en aluminium par électrolyse. Il faut environ quatre tonnes de bauxite pour produire deux tonnes d'alumine, qui permettent à leur tour de produire une tonne d'aluminium. [27]

I.5.2.4 Sable

Le sable est un matériau solide granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale (essentiellement des roches) ou organique (coquilles, squelettes de coraux, etc.) dont la dimension est comprise entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths, etc.) ainsi que des débris calcaires.[28]

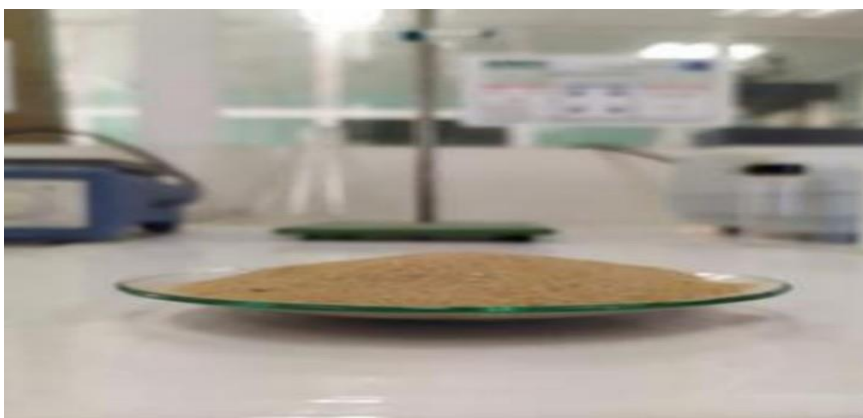


Figure I.17.Sable [24]

➤ Elle se présente sous plusieurs formes :

1. Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire. [13]

2. Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux.[13]

I.5.3 Les Matières secondaires

I.5.3.1 Pouzzolane

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.[29]



Figure I.18. Pouzzolane

La pouzzolane est deux types :

1. La pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolanique . Elle est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). La somme des trois oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) doit être supérieure à 70% selon la norme Américaine ASTM C-618.[30]

Tableau I.5. Composition chimique de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.[26]

Composant	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	PAF
%	4.90	1.98	16.20	38.60	5.08	1.34	9.82	11.05	2.6

La surface spécifique de Blaine de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf est : $\text{SSB} = 4326 \text{ cm}^2/\text{g}$.
La masse volumique absolue de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf est : $\rho = 2.49 \text{ g/cm}^3$ [22]

2. Pouzzolane Artificielle

Les pouzzolanes artificielles peuvent être obtenues à partir des argiles ayant subi un traitement thermique approprié pour lui assurer les propriétés pouzzolaniques.[27]

I.5.3.2 Le laitier

Le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte, formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Il est composé essentiellement de chaux (CaO), de magnésie (MgO), de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃). Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 à 300 kg de laitier, qui se présente sous forme de roche liquide à environ 1500 °C, obtenue après séparation du fer fondu au bas du haut-fourneau. [31][32]

Tableau I.6. Composition chimique du laitier granulé [9]

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
%	40-50	26-32	12-20	2-6

I.5.3.3 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de CO combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO₂ et de Al₂O₃; la proportion de SiO₂ réactive constituant au moins 25 % de la masse.[33]

I.5.3.4 Les schistes calcinés (T)

Acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est notamment le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières à une température d'environ 800°C. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bi calcique (C₂S) et de l'aluminate mono calcique (CA) ainsi que des petites quantités de chaux libre (CaOL), de sulfate de calcium et de silice. Ces ajouts finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques couplées à des propriétés pouzzolaniques.[22]

I.5.3.5 Les fumées de silice

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de Ferro silicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C. [24]

D'un point de vue chimique, la fumée de silice est composée essentiellement de silice, sa teneur varie selon le type d'alliage produit. Les particules de la fumée de silice se présentent sous forme sphérique avec des diamètres allant de 0,1µm à 1 ou 2µm, de telle sorte qu'une particule de fumée de silice est 100 fois plus petite qu'un grain de ciment.[4]

I.5.3.6 Fillers

Ce sont des « constituants secondaires » des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5%en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui

agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liant (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).[34]

I.6 Le clinker

Le clinker est le principal constituant des ciments courants. C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) vers 1450 °C d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire (80 % environ) et d'argile (20 % environ). [35]



Figure I.19. Clinker

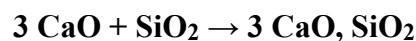
I.6.1 Définition de clinkérisation

Le clinker est un produit intermédiaire dans la fabrication du liant hydraulique. Au moyen d'un traitement thermique simple, un mélange de minéraux naturels non hydrauliques (calcite, quartz, argiles et feldspaths) est transformé en mélange intime de minéraux actifs hydrauliquement, alite, bélite, aluminat et ferrite, appelé clinker. Tout comme d'autres produits tels que les céramiques, briques, etc., le clinker peut être considéré comme étant une roche produite synthétiquement. Le traitement thermique de chauffage et de refroidissement, responsable de cette "métamorphose", est appelé "Clinkérisation".[13]

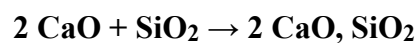
L'alite et la bélite sont des phases de silicate de calcium. Constituée uniquement de CaO et de SiO₂, l'alite est une phase de silicate tricalcique (Ca₃SiO₅) et la bélite une phase de silicate bicalcique (Ca₂SiO₄).

La phase aluminat formée par du CaO et du Al₂O₃, est une phase aluminat tricalcique (Ca₃Al₂O₆) et la phase ferrite, formée par du CaO, de l'Al₂O₃ et du Fe₂O₃, est une phase aluminoferrite tétracalcique (Ca₄Al₂Fe₂O₁₀). [36] [19]

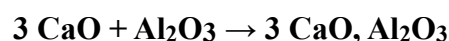
✚ Silicate tricalcique C₃S Alit (3CaO, SiO₂):



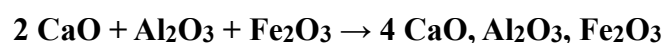
✚ Silicate bicalcique C₂S Bélite (2CaO, SiO₂).



✚ Aluminat tricalcique C₃A Cérite (3CaO, Al₂O₃).



✚ Alumino ferrite tétracalcique, C₄AF Cérite (4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃).



I.6.2 Composition chimique du clinker

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.[4]

Le clinker portland comprend les oxydes suivants :

Tableau I.7. Les compositions chimiques de clinker [37]

Oxydes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
	62-67	19-25	2-9	1-5	0-3	0,2	0,6	1-3

I.6.3 Composition minéralogique de clinker

La composition minéralogique moyenne du clinker est comprise dans les limites suivante :

Tableau I.8. Composition minéralogique de clinker [26]

Formule complète	Formule abrégée	Appellation courante	Teneurs (%)	limites
3CaO.SiO₂	C ₂ S	Silicate tricalcique (Alite)	50 à 70%	
2CaO.SiO₂	C ₃ S	Silicate bicalcique (Bélite)	15 à 30%	
3CaO.AL₂O₃	C ₃ A	Aluminate tricalcique	5 à 15 %	
4CaO.AL₂O₃.Fe₂O₃	C ₄ AF	Alumino-ferrite-tetracalcique	5 à 10 %	

I.6.3.1 Silicate tricalcique (Alite)

L'alite est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %). Il s'agit d'une forme impure du silicate tricalcique de formule C₃S réagissant très rapidement avec l'eau. L'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux hydrates à l'origine des propriétés mécaniques du ciment durci. [38]

I.6.3.2 Silicate bicalcique (Bélite)

Le silicate bicalcique (C₂S), également appelé bélite ou orthosilicate par les producteurs de ciment, représente entre 15 et 30% de la composition du ciment Portland. Il s'agit d'une forme impure de C₂S contenant, en plus du potassium, les mêmes ions étrangers que dans le C₃S, mais en proportion plus élevée. Sur le plan morphologique, la bélite se présente sous forme de grains arrondis caractéristiques. Sur le plan des performances mécaniques, sa contribution au développement des résistances se manifeste principalement à long terme, son hydratation étant lente et progressive comparativement à celle de l'alite. [13][39]

I.6.3.3 Aluminate tricalcique

Le C₃A, qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante. Dans les clinkers, la présence d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C₃A. [40]

I.6.3.4 Alumino-ferrite-tetracalcique

La composition totale du ciment Portland contient entre 5 et 10% de l'Alumino-ferrite tétracalcique. La réactivité du C_4AF dans l'eau est moyenne, et elle s'intensifie avec une teneur plus élevée en alumine.

Les C_4AF et C_3A se trouvent à l'état liquide à la température de fabrication du clinker, et elles forment une phase interstitielle qui se cristallise au cours de l'opération du refroidissement entre les cristaux de C_2S et C_3S . [41]

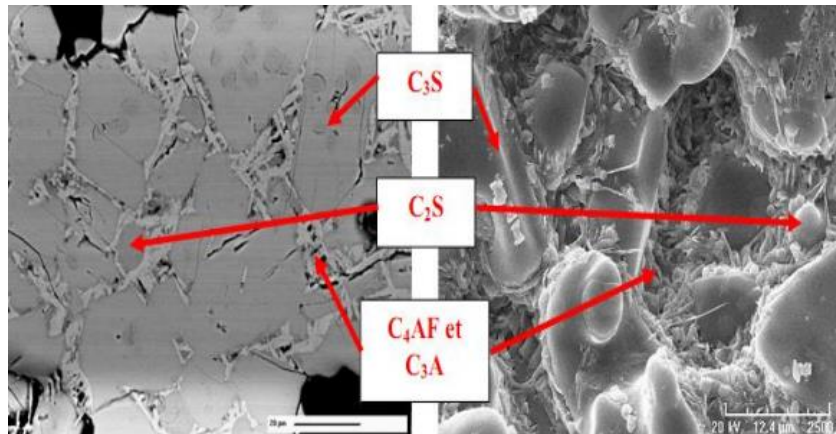


Figure I.20. Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés.[4]

I.7 Broyage de clinker

Le clinker est un semi-produit, impropre à la vente, il doit être transformé en ciment. Le ciment est obtenu par broyage des granules de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse (4 – 5%) comme régulateur de prise et éventuellement 15 à 20 % d'un ou deux constituants secondaires.

Le broyage a pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains, ce qui développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses propriétés rhéologiques. L'opération est réalisée dans un broyeur à boulets comportant un compartiment de dégrossissage à l'entrée et un compartiment de finissage à la sortie, équipés de blindages releveurs et séparés par une cloison releveuse permettant le passage des particules broyées.[42]

I.7.1 La broyabilité de clinker

La broyabilité est l'énergie qu'il faut fournir à une certaine masse d'un matériau pour le fractionner à une certaine taille. Cette grandeur permet donc de classer des matériaux selon la facilité avec laquelle ils sont broyés.

Le broyage du clinker comporte des étapes distinctes, et dans chacune d'elle certains facteurs déterminent l'avancement de la fragmentation. Dans une première étape, il existe une corrélation entre la broyabilité et la porosité contenue dans l'édifice cristallin du clinker. Ensuite, pour des surfaces supérieures à 2000 cm²/g, le broyage dépend :

- des microfissurations du clinker,

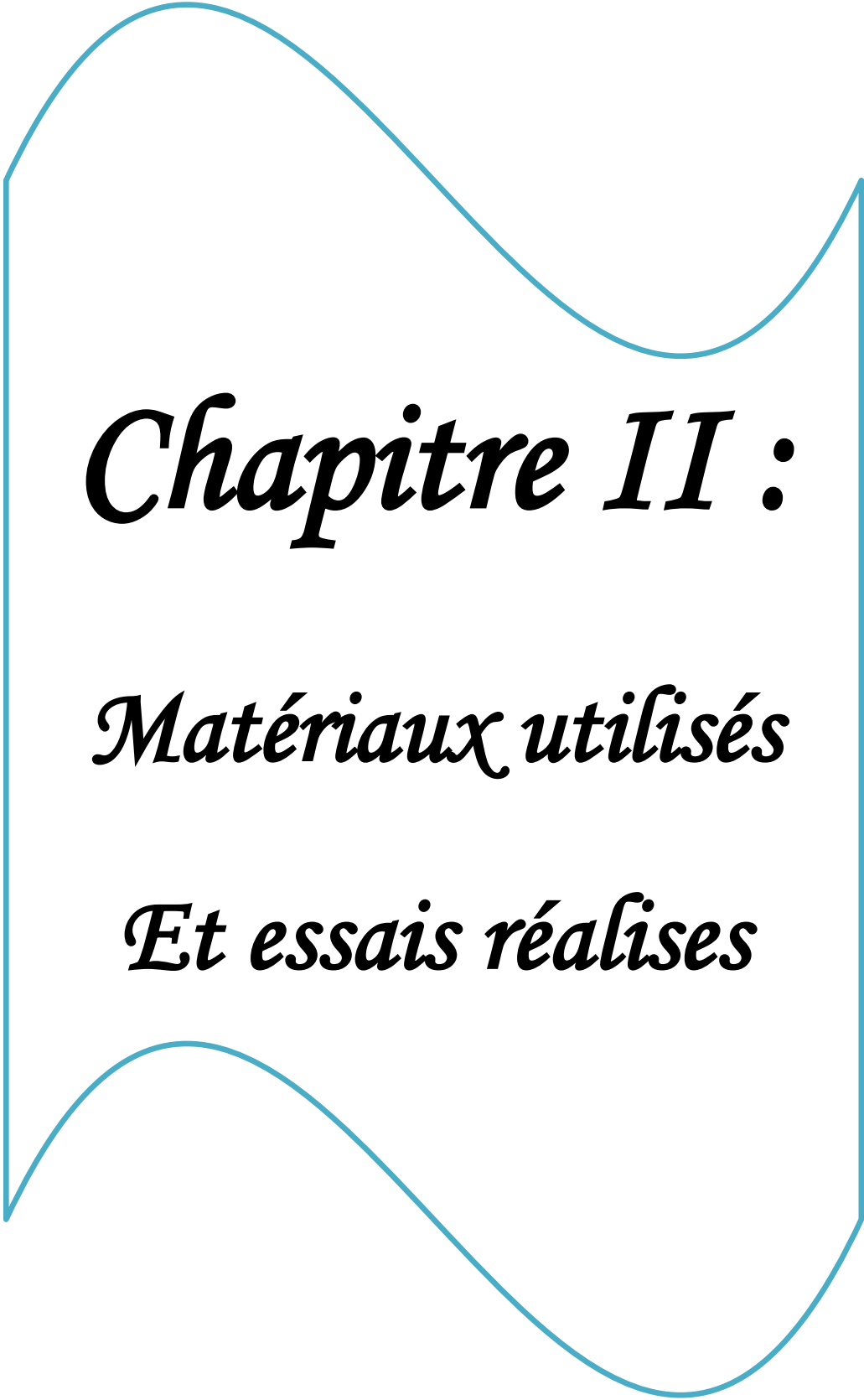
- des dimensions et de la nature des cristaux de clinker

Le clinker présente une bonne broyabilité s'il contient plus de C_3S , moins de C_3A et une forte microfissuration lors du refroidissement (le plus possible de petits cristaux). Selon certains chercheurs, plus le rapport $[(C_3S + C_2S) / (C_3A + C_4AF)]$ est élevé, plus facile est la broyabilité. [43] [44]

I.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les généralités sur le ciment Portland, son historique, sa classification ainsi que les matières premières et secondaires utilisées dans sa fabrication. Les principaux procédés et étapes de fabrication du ciment ont également été décrits, depuis l'extraction jusqu'au produit fini.

Ces notions constituent une base essentielle pour comprendre l'industrie cimentière. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude du clinker, en tant que constituant principal du ciment, ainsi qu'à sa formation et ses caractéristiques.



Chapitre II :

Matériaux utilisés

Et essais réalisés

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Béni-saf.

II.1 Introduction

L'industrie du ciment, pilier du développement des infrastructures mondiales, fait face aujourd'hui à un double défi majeur répondre à des exigences de performances mécaniques de plus en plus élevées tout en réduisant son empreinte carbone. La production de clinker, constituant principal du ciment, est responsable d'environ 5% à 8% des émissions mondiales de CO₂.

Pour améliorer le bilan environnemental de ce matériau tout en préservant ses propriétés structurales, la recherche s'oriente vers l'incorporation d'additifs. Cette démarche vise non seulement à optimiser l'efficacité énergétique des procédés de fabrication, mais aussi à s'inscrire durablement dans une économie circulaire.

II.2 Objectif de travail

Le présent travail vise à quantifier l'influence de la finesse (exprimée par le refus au tamis de 45µm) sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment. Notre démarche scientifique s'articule autour de deux parties :

- ✓ **Partie 01** : étude de la finesse et caractérisation des propriétés du ciment
 - **L'étude du broyage progressif** : L'obtention de différents niveaux de finesse à partir d'un ciment industriel de référence afin d'établir une corrélation précise entre granulométrie et réactivité.
 - **La caractérisation des performances** : L'évaluation rigoureuse des résistances mécaniques aux échéances de 2, 7 et 28 jours, permettant d'identifier la finesse optimale.
- ✓ **Partie 02** :
 - **L'optimisation par substitution** : L'exploitation de la réserve de résistance générée par l'augmentation de la finesse pour intégrer de la pouzzolane naturelle, substituant ainsi une partie du clinker.

Cette étude ne se limite pas à l'amélioration de la réactivité du ciment ; elle propose un modèle de substitution durable. En favorisant l'utilisation de ressources locales, elle permet de produire un ciment à plus faible empreinte carbone tout en restant économiquement compétitif.

II.3 Protocole de préparation des échantillons de ciment

II.3.1 Matériau d'étude (Le ciment)

Le liant utilisé pour cette étude est un ciment Portland composé de type CEM II/A-P 42.5 N, fabriqué conformément aux normes et standards de fabrication en vigueur par la cimenterie BS. Ce ciment contient initialement un taux de substitution de 8 % de pouzzolane naturelle.

II.3.2 Echantillon de départ

- **Prélèvement** : Un lot de 10 kg de ciment industriel a été prélevé directement en sortie du broyeur ciment.
- **Caractéristique initiale** : Afin de permettre une étude significative du broyage, l'échantillon choisi présente un refus initial au tamis de 45 µm supérieur ou égal à 25 %. Cette granularité grossière constitue notre point de référence (échantillon témoin).
- **Homogénéisation** : L'ensemble du lot est soumis à une homogénéisation soignée pour garantir la représentativité des sous-échantillons lors des essais ultérieurs.

✓ **Remarques techniques :**

- **Conditions de conservation :** le ciment prélevé a été conservé à l'abri de l'humidité dans des sacs hermétiques étanches) pour éviter toute pré-hydratation.
- **Méthode de prélèvement :** le prélèvement a été effectué selon la méthode de quartage pour assurer l'homogénéité du lot de 10 kg.

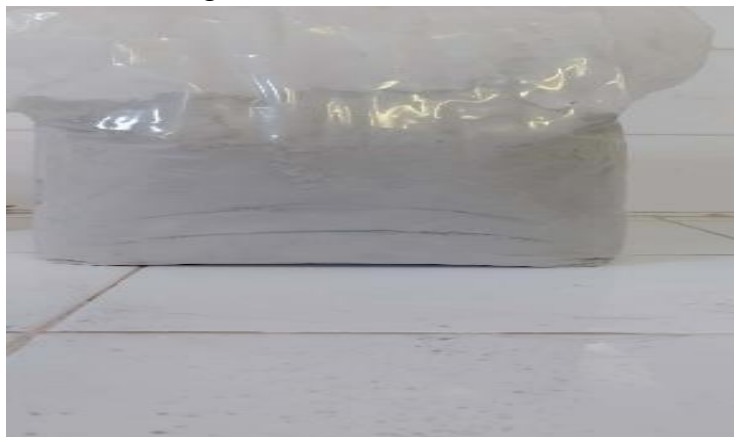


Figure II.1. Echantillon de départ

II.3.3 Division et préparation des échantillons

Après une homogénéisation complète du lot de 10 kg, celui-ci est divisé en cinq (05) échantillons représentatifs de 2 kg chacun en utilisant la méthode de quartage. Cette subdivision permet de tester cinq états de finesse distincts et d'observer l'évolution des propriétés du ciment de manière granulaire:

- **E1 :** Échantillon témoin (ciment industriel tel quel).
- **E2 à E5 :** Échantillons soumis à un re-broyage d'intensité croissante.

II.3.4 Protocole de broyage progressif

Le re-broyage est effectué à l'aide d'un broyeur à disques automatique (HERZOG) de laboratoire. L'objectif est de réduire progressivement le refus à 45µm pour atteindre une finesse cible très faible le dernier échantillon.

Tableau II.1. Matrice de préparation et objectifs de finesse

Échantillon	Description (intensité de broyage)	Refus cible à 45µm (%)
E1	Ciment initial (échantillon de référence Sans re-broyage)	25
E2	Ciment après un re-broyage léger	20
E3	Ciment après un re-broyage moyen	15
E4	Ciment après un re-broyage avancé	10
E5	Ciment après un re-broyage poussé	05

✓ **Remarque :**

Maîtrise de la température : Le broyage à disques génère une chaleur importante. C'est pourquoi les échantillons sont laissés refroidir dans un milieu sec avant de réaliser les tests de prise et de consistance, afin de ne pas fausser les résultats chimiques.

- **Le broyeur HERZOG**

Le broyeur HERZOG (Marche automatique) a été utilisé pour le broyage des constituants (ciment). La procédure de broyage est comme suit :[45]

- Ouvrir le capot de la machine.
- Ouvrir le couvercle du disque.
- Verser l'échantillon dans le disque de broyage (200g).
- Fermer le couvercle du disque de broyage.
- Fermer le capot de la machine.
- Choisir la durée de broyage
- Activer le bouton.



A : Pièces constituant le broyeur (HERZOG).



B : Opération de broyage



C : Ciment broyé

Figure II.2. Broyage de ciment

II.3.5 Mesure des refus au tamis de 45 μ m

II.3.5.1 Objectif

Cette étape vise à quantifier précisément la finesse de chaque échantillon après le passage au broyeur à disques. La mesure du refus permet de contrôler l'efficacité du broyage et de s'assurer que chaque échantillon (E1 à E5) respecte les objectifs granulométriques fixés pour l'étude.



Figure II.3. Matériel d'essai refus EN 196-6 /NA 443 [46][47]

II.3.5.2 Mode opératoire

La détermination de la finesse est réalisée par tamisage manuel selon la méthode de contrôle utilisée au laboratoire :

1-Prélèvement : Peser avec précision une masse $M_0 = 25$ g de ciment.

2-Tamisage : Déposer l'échantillon sur le tamis de $45\ \mu\text{m}$ (Le tamis doit être parfaitement propre et sec avant chaque essai). le ciment est ensuite tamisé à l'aide d'un tamiseur prématic, où les particules fines sont aspirées à travers la maille tandis que le refus reste à la surface du tamis. le refus obtenu est finalement pesé pour déterminer la finesse de ciment .



Figure II.4. Opération de tamisage du ciment sur le tamis de $45\ \mu\text{m}$

3-Pesée du refus : Peser la fraction de matériau restant sur le tamis, notée M_1 .

➤ **Calculer le % de refus**

Le pourcentage de refus (R) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$R (\%) = (M_1/M_0) \times 100$$

Où :

- **M_0** : Masse initiale de l'échantillon (25 g).
- **M_1** : Masse du refus restant sur le tamis (g).

Après la préparation des échantillons par re broyage et l'obtention des différents niveaux de finesse, ceux-ci ont été soumis à des analyses physico-chimiques. Ces analyses comprennent, d'une part, des méthodes chimiques permettant la détermination de la perte au feu (PF) et des principaux oxydes (SiO_2 , etc.), et d'autre part, des essais physico-mécaniques. L'ensemble de ces essais permet de caractériser les échantillons selon leur composition et leurs propriétés.

II.4Analyses chimiques

Conformément à la norme **NA 442**, l'analyse chimique au sein de la cimenterie de Béni-Saf repose sur deux protocoles de mise en solution, choisis selon la nature de l'échantillon :

- **Fusion alcaline** : Pour les matières premières et les matières crues (calcaire, argile, ajouts).
- **Attaque acide** : Pour les produits finis et semi-finis (clinker et ciment).

Dans le cadre de notre étude, nous avons procédé à une attaque acide sur nos échantillons de ciment pour isoler les différents oxydes. **NA 442 [48]**

➤ **Protocole d'attaque par l'acide perchlorique (HClO_4)**

Le mode opératoire suivi pour la mise en solution est le suivant :

1. **Prise d'essai** : Peser avec précision 2 (g) de ciment et les introduire dans un bécher de 500 (ml) parfaitement sec.
2. **Solubilisation** : Ajouter 10 (ml) d'acide perchlorique concentré et quelques gouttes d'eau distillée. Agiter à l'aide d'une baguette en verre jusqu'à l'obtention d'une dissolution complète.

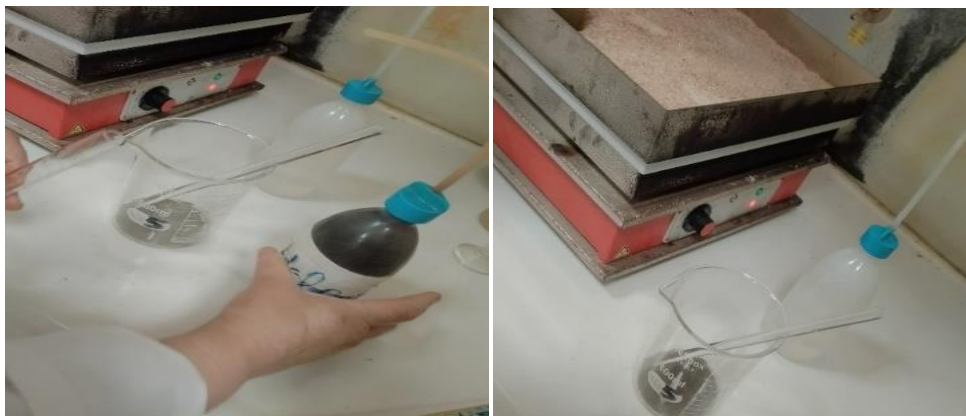


Figure II.5. Attaque acide des échantillons de ciment

3. **Évaporation et déshydratation** : Placer le bécher sur un bain de sable. Chauffer jusqu'à l'évaporation totale de la solution. Cette étape est critique : le bécher doit être retiré dès que les fumées blanches d'acide perchlorique disparaissent pour éviter la calcination du résidu.



Figure II.6. Évaporation de la solution sur bain de sable

4. **Reprise** : Après refroidissement partiel, ajouter environ 150 (ml) d'eau distillée tiède et 10 (ml) d'acide chlorhydrique (HCl) concentré pur pour remettre en solution les sels solubles.

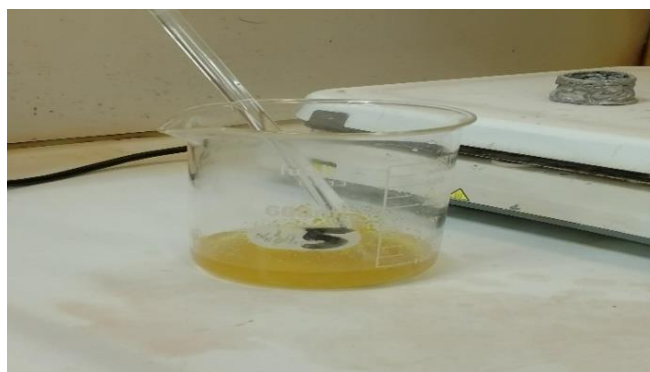


Figure II.7. Reprise de la solution avec HCl concentré et eau distillée

5. **Mise en ébullition** : Chauffer l'ensemble sur une plaque chauffante pour favoriser la solubilisation totale avant la filtration.



Figure II.8. Mise en ébullition de la solution

6. Filtration

La solution obtenue est filtrée sur papier filtre afin de séparer les résidus insolubles. La silice reste retenue sur le papier filtre, tandis que le filtrat récupéré contient les autres oxydes dissous destinés aux analyses chimiques ultérieures.

II.4.1 Détermination de la silice (SiO₂)

Peser un creuset en platine propre et sec (P₁). Ensuite, on met le papier filtre et son contenu dans le creuset et puis on laisse dans le four à température d'environ 950°C à 1000 °C pendant 1 heure pour déshydrater la silice.

Retirer le creuset et le faire refroidir, prendre sa pesée (P₂).



Figure II.9. Détermination de la silice (SiO₂) [9]

$$\%SiO_2 = (P_2 - P_1) \times 100 / P. E$$

P.E: poids d'échantillon

Analyse du reste des oxydes : La solution liquide obtenue après filtration servira à doser le calcium (CaO), la magnésie (MgO), l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃) par complexométrie ou photométrie.



II.4.2 Dosage des oxydes par complexométrie

Après filtration et ajustement de la solution dans une fiole jaugée de 500 (ml), nous procédons au dosage des oxyde majeurs. EN 196-2 [49]

II.4.2.1 Détermination de l'oxyde de calcium (CaO)

Le dosage du calcium s'effectue par titrage à l'EDTA en milieu fortement basique suivant le mode opératoire suivant :

1. **Prélèvement :** Prélever une fiole de 50 (ml) de la solution mère.
2. **Ajustement du pH :** Ajouter 40 (ml) de soude (NaOH) à 2N afin de stabiliser le pH entre 12 et 13. Cet environnement basique est indispensable pour précipiter le magnésium et permettre le dosage sélectif du calcium.
3. **Masquage des interférences :** Ajouter 15 (ml) de tri-éthanolamine (TEA). Ce réactif joue le rôle d'agent complexant pour "masquer" les ions fer (Fe₂O₃) et aluminium (Al₂O₃) qui pourraient fausser le virage.
4. **Indication colorée :** Ajouter une pincée de calcéine. La solution prend alors une coloration verte fluorescente caractéristique.
5. **Titrage :** Titrer avec une solution d'EDTA jusqu'au virage net de la couleur du **vert au violet** (noter le volume V1).

$$\% \text{CaO} = V_{\text{ml (E.D.T.A) versé}} \times \text{coefficient de la CaO}$$

%CaO : Le pourcentage de la chaux (1.007)

V (ml) : Le volume d'EDTA nécessaire pour doser CaO.

Remarques

1. La formule de base du coefficient (C)

Le coefficient est le chiffre qui permet de convertir 1 ml d'EDTA en pourcentage d'oxyde. La formule théorique est :

$$C = (M_{\text{oxyde}} \times [\text{EDTA}] \times F) / (m_{\text{échantillon}} \times 10)$$

- **M_{oxyde}** : Masse molaire de l'oxyde (CaO = 56,08 g/mol ou MgO = 40,30 g/mol).
- **[EDTA]** : Concentration molaire de votre solution (ex : 0,02 mol/L).
- **F** : Facteur de dilution de votre fiole (dans notre cas : 500/50 = 10).
- **m_{échantillon}** : Masse de ciment pesée (2 g).

1.1. Calcul du coefficient pour le CaO

Si l'on prend l'exemple standard d'une solution d'EDTA à 0,02 mol/L :

$$C_{\text{CaO}} = (56,08 \times 0,02 \times 10) / (2 \times 10) = 0,5608$$

- **Résultat** : Chaque ml d'EDTA versé à pH 12 correspond à 0,5608 % de CaO.

1.2. Calcul du coefficient pour le MgO

Le calcul est identique, mais on remplace la masse molaire par celle du magnésium :

$$C_{\text{MgO}} = (40,30 \times 0,02 \times 10) / (2 \times 10) = 0,4030$$

- **Résultat** : Chaque ml de différence ($V_{\text{total}} - V_{\text{CaO}}$) correspond à 0,4030 % de MgO.

II.4.2.2 Détermination de l'oxyde de magnésium (MgO)

Le dosage du magnésium repose sur le titrage de la somme des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , suivi d'une soustraction du volume de calcium précédemment obtenu.

• Mode opératoire

1. **Prélèvement** : Prélever 50 (ml) de la solution mère filtrée (la même que pour le CaO).
2. **Masquage** : Ajouter 20 (ml) de tri-éthanolamine pour neutraliser les interférences du fer et de l'aluminium.
3. **Indication colorée** : Ajouter quelques gouttes de l'indicateur spécifique (généralement le Noir d'Ériochrome T ou NET). La solution prend alors une teinte violette / rouge
4. **Tamponnage** : Ajouter 10 (ml) de solution d'ammoniaque (NH_4OH) pour stabiliser le pH entre 10 et 11.
5. **Titrage** : Titrer avec l'EDTA jusqu'au virage net vers le bleu (noter le volume versé V_{total}).



Figure II.10. Détermination de l'oxyde de magnésium (MgO)

$$\% \text{MgO} = (V_{\text{total}} - V_{\text{CaO}}) \times \text{coefficient MgO}$$

$V_{\text{MgO}} = V_{\text{total}} - V_{\text{CaO}}$

V_{MgO} : volume E.D.T.A versé pour le titrage de MgO (0.724).

V_{CaO} : volume E.D.T.A versé pour le titrage de CaO (1.007).

II.4.2.3 Détermination de l'oxyde du fer Fe_2O_3

Prendre 50 ml de la solution, on ajoute 3 gouttes de bromophenol, on verse de NH_4OH Jusqu'à apparition d'une teinte bleu fugitif (le dépassement de la teinte bleu provoque la précipitation de Al_2O_3) On ajoute 20ml d'Hcl à N/10 pour obtenir PH 1.5(Utilisation d'un pH-mètre pour que la sélectivité vis-à-vis de l'aluminium soit totale). Ensuite on ajoute 15ml solution PH 1.5 (seul le Fe_2O_3 est complexé).

Ajouter 15 à 20 gouttes d'acide salicylique qui donne une coloration violette. Chauffer Jusqu'à 40°C - 50°C (La cinétique de complexation du fer avec l'E.D.T.A. est lente à température ambiante) pour préciser le dosage Fe_2O_3 . Verser l'E.D.T.A. jusqu'à l'apparition de la couleur jaune.



Figure II.11. Détermination de l'oxyde du fer Fe_2O_3

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = V_{\text{ml (E.D.T.A)}} \times \text{Coefficient de}$$

V_{EDTA} : Le volume d'EDTA nécessaire pour doser le Fe_2O_3 (1.433).

II.4.2.4 Détermination de l'oxyde d'alumine Al_2O_3

Prendre 50 ml de la solution utilisée pour le dosage du fer, puis ajouter de l'acétate d'ammonium jusqu'à atteindre un pH de 3,6 (virage bleu). Ensuite, ajouter 5 ml d'acide acétique pour ajuster le pH à 3,2. Pour complexer l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), ajouter 10 gouttes de complexonate de cuivre.

Ajouter ensuite 10 gouttes de PAN, ce qui donne une teinte rose violacée. Porter le mélange à ébullition pour accélérer la complexation de Al_2O_3 . Titrer avec l'EDTA jusqu'à observer un virage jaune persistant ; la couleur violette réapparaîtra tant qu'il reste de l'alumine non complexée.

Ajouter 10 gouttes de complexonate de cuivre et 10 gouttes de PAN ce qui donne une teinte rose violacée.

Titrer avec l'EDTA jusqu'à observer un virage jaune



Figure II.12. Détermination de l'oxyde d'alumine Al_2O_3

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = V_{\text{EDTA}} \times \text{Coefficient}_{\text{Al}_2\text{O}_3}$$

V_{EDTA} : Le volume d'EDTA nécessaire pour doser le Al_2O_3 (0.915)

✓ L'importance de l'ébullition

Contrairement au fer, la complexation de l'aluminium par l'EDTA est **très lente** à froid.

- **Amélioration :** Maintenez une ébullition douce pendant au moins **2 à 3 minutes** après l'ajout de l'indicateur et avant de commencer le titrage. Cela garantit que tout l'aluminium a réagi.
- **Titrage à chaud :** Le titrage doit être effectué alors que la solution est encore très chaude (environ 70-80°C). Si la solution refroidit, le virage devient incertain.

II.4.3 Détermination de la chaux libre CaO_L :

La chaux libre représente la fraction de l'oxyde de calcium qui n'a pas réagi avec les autres oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) lors de la clinkérisation. Une teneur trop élevée peut provoquer une expansion du ciment et nuire à sa durabilité EN 196-21 [26] [50]

➤ Principe de la méthode

- Pèse 1 g de matière finement broyé pour optimiser la réaction (clinker ou ciment).
- Mettre dans un erlenmeyer propre et bien séché.
- Ajouter ensuite 50 ml d'éthylène glycol.
- Chauffer notre solution à 70 °C pour assurer une extraction complète.
- Utilisation d'un agitateur magnétique permet une extraction beaucoup plus efficace.
- Filtrer la solution (filtre moyen).

- Ajouter quelques gouttes de bleu de bromocrésol ; qui donne la couleur bleue.
- Titre avec HCl N/10 jusqu'à l'apparition de la couleur jaune.



Figure II.13. Détermination de la chaux libre CaOL

$$\%CaO_L = T * V_{HCL}$$

V_{HCL} : Volume de la solution titrante versé (ml)

T: Coefficient de titrage

II.4.4 Détermination de la perte au feu (PAF)

Pour commencer, on utilise une capsule en platine propre et sèche, dans laquelle on met 1g de matière cuite. On pèse l'ensemble, ce qui donne P1. Ensuite, on met la capsule dans un four à moufle pour être calcinée à 1000 °C pendant 15 minutes. Après le processus, on retire la capsule et on la pèse à température ambiante, ce qui correspond à P2. **EN 196-2 [49]**

Remarque

- La capsule doit être placée immédiatement dans un dessiccateur pendant 30 min avant de la peser.
- Pour plus de précision on remet la capsule 5 minutes au four après la première pesée pour vérifier que la masse ne varie plus

$$PAF = (P1 - P2) * 100$$



Figure II.14. Détermination de la perte au feu (PAF)

II.4.5 Détermination du pourcentage de SO₃

La détermination du pourcentage de trioxyde de soufre (SO₃) dans le ciment est une étape cruciale pour contrôler le temps de prise et la stabilité volumétrique du ciment.

- Peser 1 g de ciment (m)
- Ajouter 20 ml d'eau distillée et 15 ml de HCl N/2 et porter à ébullition
- Filtrer cette solution pour éliminer le résidu insoluble.
- Ajoute 15 ml de BaCl₂ (100 g/l) goutte à goutte sous agitation constante au filtrat bouillant pour former un précipité de sulfate de baryum (BaSO₄).
- Procéder à une filtration sur filtre lent puis laver le précipité et le papier filtre à l'eau distillée bouillante
- Peser un creuset (P1)
- Mettre le filtre et son contenu dans le creuset. Ensuite on calcine au four à (800 –900) °C pendant 30 minutes, retirer le creuset, laisser refroidir puis le peser (P2).



Figure II.15. Détermination du pourcentage de SO₃

$$\%SO_3 = (P2 - P1) * 0,343 * 100) / m_{\text{échantillon}}$$

Le facteur 0,343 correspond au rapport des masses molaires M_{SO₃} / M_{BaSO₄})

II.4.6 Détermination des résidus insolubles

Elle permet de mesurer la fraction du matériau qui ne se dissout pas lors d'une attaque acide

- Peser 1 g de ciment. (M_{échanti})
- Ajouter 20 ml d'eau distillée et 15 ml de HCl N/2.
- Porter le mélange à ébullition.
- Filtrer la solution à l'aide d'un bécet et d'un filtre rapide à ce niveau l'objectif était de dissoudre les phases solubles du ciment (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF).
- Placer le papier filtre avec son contenu dans un bécet et ajouter 100 ml d'eau distillée ainsi que 5 g de bicarbonate de sodium pour dissoudre la silice complexée.
- Chauffer jusqu'à ébullition.
- Déchirer le papier filtre à l'aide d'une spatule.
- Procéder à une deuxième filtration (avec un filtre moyen) et rincer avec 25 ml d'acide HCl et 25 ml d'eau distillée.
- Peser un creuset (P1).

- Placer le papier filtre déchiré et son contenu dans le creuset, puis calciner au four à 1000 °C p
- Pendant 30 minutes. Retirer le creuset, laisser refroidir et peser (P2).



Figure II.16. Détermination des résidus insolubles EN 196-2[4][49]

$$\%RI = (P2 - P1) \times 100 / M_{\text{échant}}$$

- P1 : Masse du creuset vide (g).
- P2 : Masse du creuset + résidu calciné (g).
- M_{échant} : Masse de la prise d'essai (1 g).

II.5 Analyse par fluorescence des rayons X (XRF)

C'est la méthode la plus efficace pour le contrôle de production en cimenterie. Elle permet d'obtenir en quelques minutes la composition chimique complète (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, K₂O, MgO...). ISO 29581-2[26][51]

La préparation des pastilles est une étape critique : si la pastille est mal préparée, les résultats seront faussés, peu importe la performance de l'appareil.

➤ Préparation des pastilles

Pour le ciment et les matières premières, on utilise généralement des **pastilles pressées**. Voici les étapes:

1. **Séchage et Broyage** : broyer 10 g de l'échantillon à une granulométrie inférieure à 63 micromètres pour garantir que chaque échantillon a la même texture, l'échantillon doit être parfaitement sec.
2. **Mélange** : On mélange la poudre avec 1 g de liant (généralement une cire de type *C-Wax*) qui sert de colle (**du stéarate de zinc ou de la cire de polyéthylène**)
3. **Pressage** : Le mélange est placé dans un moule en acier et soumis à une pression de 150 K.N à l'aide d'une pastilleuse automatique pendant environ 20 à 30 secondes.
4. **Résultat** : On obtient un disque solide, lisse et brillant, prêt à être inséré dans le spectromètre



A : Machine de préparation des pastilles

B : Pastilles

C : Appareille XRF

D : Résultats des analyses

Figure II.17. Analyse des pastilles par fluorescence des RX

➤ La Perle Fondue (Vitrification)

L'échantillon est mélangé à un fondant (souvent du tétraborate ou métaborate de lithium) et fondu dans un creuset en platine à haute température (1000°C - 1200°C) pour former un verre homogène.

• Avantages

- **Précision absolue** : Élimine totalement les effets de granulométrie et de minéralogie.
- **Homogénéité** : Le résultat est une solution solide parfaite.
- **Large gamme** : Idéale pour les matériaux hétérogènes comme le ciment, les roches, les minerais.



A :Porte perle

B :Perleuse

C :XRF

Figure II.18. Machine de préparation des perles

II.6 Méthodes physiques

Les essais physiques sont principalement réalisés sur :

- Le ciment (mesure de la finesse et tamisage alpine)
- La pâte c'est-à-dire : ciment plus eau (mesure de la consistance normalisée, du temps de prise et de la stabilité)
- Le mortier (résistances mécaniques : à la compression et à la flexion).

II.6.1 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine

II.6.1.1 But de l'essai

Déterminer la surface spécifique du ciment, exprimée en centimètres carrés par gramme (cm^2/g), en mesurant la résistance au passage d'un flux d'air à travers un lit de ciment compacté.

-Plus, le ciment est **fin**, plus les pores entre les grains sont petits et nombreux.

-Plus ces pores sont petits, plus l'air met de **temps** à traverser l'échantillon. [46][47]

II.6.1.2 Équipements et Matériaux

- Appareil de Blaine : (cellule, piston, tube en U avec liquide manométrique).
- Papier filtre circulaire : (adapté au diamètre de la cellule).
- Chronomètre précis au 1/5 de seconde.
- Balance de précision au (0,001 g près).
- Vaseline (pour l'étanchéité).
- Échantillon de ciment (sec et homogénéisé).

II.6.1.3 Préparation de l'échantillon

Avant l'essai, calculer la masse de ciment (m) à peser pour obtenir une porosité de $e = 0,500$ selon la formule :

$$m = \rho * V$$

- ρ : Masse volumique du ciment (g/cm^3).
- V : Volume du lit de ciment dans la cellule (cm^3).

II.6.1.4 Procédure Expérimentale

1. Préparation de la cellule

1. Placer la grille perforée au fond de la cellule de mesure.
2. Déposer un premier disque de papier filtre neuf sur la grille à l'aide d'une tige propre.
3. Verser la masse calculée (m) de ciment à l'aide d'un entonnoir.
4. Taper légèrement les parois de la cellule pour aplanir la surface du ciment.
5. Poser un second disque de papier filtre sur le dessus du lit de ciment.

2. Compactage

1. Insérer le piston et presser doucement jusqu'à ce que son collier bute contre le haut de la cellule.
2. Maintenir la pression un court instant, puis retirer le piston lentement pour ne pas aspirer la poudre.

3. Mesure de la perméabilité

1. Appliquer une fine couche de vaseline sur le rodage de la cellule.
2. Fixer la cellule sur le tube manométrique en effectuant une légère rotation pour assurer l'étanchéité.
3. Vérifier que le liquide manométrique est bien au niveau du repère inférieur.
4. À l'aide de la poire, aspirer le liquide jusqu'au repère supérieur (le plus haut). Fermer le robinet.
5. Libérer le passage de l'air.
6. Déclencher le chronomètre lorsque le liquide touche le 2ème repère.
7. Arrêter le chronomètre lorsque le liquide atteint le 3ème repère. Notez le temps T (en secondes).

II.6.1.5 Calcul et Expression des Résultats

La surface spécifique S est calculée par la formule simplifiée : $S = k \times \sqrt{t} / \rho$

Où K est la constante de l'appareil, t temps mesuré, et ρ la masse volumique du ciment.

Valeurs Indicatives :

- **CEM I (Ciment pur) :** $S = 2800$ à $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- **CEM II (Avec ajouts) :** $S > 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ (pour compenser la perte de réactivité initiale par une plus grande finesse).

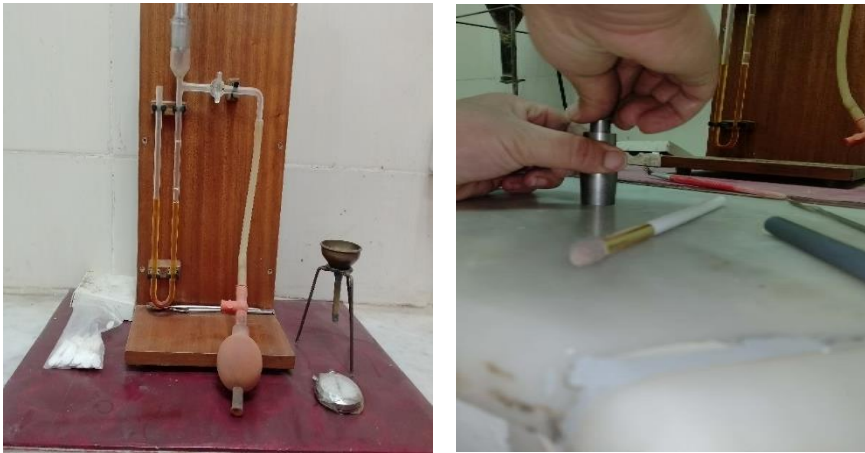


Figure II.19. Le perméabilimètre de Blaine

II.6.2 Mesure de la densité

II.6.2.1 But

Déterminer le rapport poids/volume du ciment à l'état non tassé pour calibrer le remplissage des sacs de 50 kg et optimiser le stockage en silo.

II.6.2.2 Équipements nécessaires

- Conteneur étalon : Un pot métallique cylindrique d'un volume exact de 1 dm^3 (1 litre).
- Balance : Précise au gramme près.
- Règle à araser : Pour égaliser la surface sans tasser.
- Entonnoir à large col : Pour un remplissage régulier.

II.6.2.3 Procédure Expérimentale

1. Tarage

- Peser le pot métallique vide et propre. Noter cette masse P_1 (en grammes).

2. Remplissage

- Placer l'entonnoir au-dessus du pot.
- Verser le ciment délicatement à travers l'entonnoir jusqu'à ce que le pot déborde légèrement.
- Important : Ne jamais secouer, frapper ou vibrer le pot pendant cette étape pour éviter de tasser le matériau.

3. Arasement

- À l'aide de la règle métallique, araser le surplus de ciment en un seul mouvement horizontal partant du centre vers les bords.
- Nettoyer les parois extérieures du pot pour éliminer la poussière résiduelle.

4. Pesée finale

- Peser le pot rempli. Noter cette masse P2 (en grammes).

II.6.2.4 Calculs et Expression des Résultats

La masse volumique apparente (M_v) est calculée par la formule :

$$M_v = P_2 - P_1$$

Le résultat s'exprime en g/cm^3 (ou kg/dm^3).

Note sur l'interprétation :

- Si $M_v = 1,1\text{kg/dm}^3$: Le ciment est "dense". Le volume occupé par 50 kg sera plus faible (environ 45,4 litres).
- Si $M_v = 0,9\text{kg/dm}^3$: Le ciment est très aéré. Le volume occupé par 50 kg sera plus important (environ 55,5 litres), ce qui risque de faire gonfler le sac.



Figure II.20. Mesure de la densité

II.6.3 La consistance normale

II.6.3.1 Définition

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes. Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme « NA 229 » qui consiste en la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte ciment dite normale.

II.6.3.2 Mode Opératoire (Détermination de la Consistance Normale) NA 229 [52]

Ce protocole permet de définir la quantité d'eau nécessaire (notée E) pour obtenir une pâte de ciment dont la résistance à la pénétration est normalisée.

1. Équipement Nécessaire

- Appareil de Vicat complet (avec tige coulissante et sonde cylindrique de Ø 10 mm).
- Moule tronconique (hauteur 40 mm).
- Malaxeur normalisé (ou récipient et spatule pour un gâchage manuel).
- Balance (précision à 0,1 g près) et chronomètre.



Figure II.21. L'appareil Vicat

2. Procédure Expérimentale

Étape 1 : Préparation du mélange

1. Peser 500g de ciment sec.
2. Mesurer une quantité d'eau initiale (généralement on commence avec un rapport E/C de 0,26, soit 130 g d'eau).
3. Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment
4. Déclencher le chronomètre et procéder au malaxage (environ 90 secondes à petite vitesse, puis 90 secondes à grande vitesse selon la norme).



Figure II.22. Le malaxeur.

Étape 2 : Remplissage du moule

1. Introduire immédiatement la pâte dans le moule posé sur une plaque de verre.
2. Araser la surface en enlevant l'excès de pâte avec une truelle d'un mouvement de va-et-vient, sans comprimer la pâte.



Figure II.23. Moule tronconique remplis de pâte

Étape 3 : Mesure de la consistance

1. Placer le moule sur le socle de l'appareil de Vicat, centré sous la sonde.
2. Abaisser la sonde doucement jusqu'au contact direct avec la surface de la pâte.
3. Bloquer la tige, régler l'index de graduation sur le zéro.
4. Libérer la tige brusquement (sans vitesse initiale) et la laisser s'enfoncer sous son propre poids.
5. Lire la valeur sur l'échelle après l'arrêt de la sonde (ou 30 secondes après le lâcher).



Figure II.24. Mesuré de la consistance normale

II.6.3.3 Interprétation des Résultats

La consistance est dite "normale" si la distance entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule (d) respecte la condition suivante :

$$d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

- ✚ Si $d > 7 \text{ mm}$: La pâte est trop ferme (manque d'eau). Refaire l'essai avec plus d'eau.
- ✚ Si $d < 5 \text{ mm}$: La pâte est trop fluide (trop d'eau). Refaire l'essai avec moins d'eau.

II.6.4 Essais de prise

II.6.4.1 Définition

L'essai de prise a pour but déterminer le temps de prise, c'est à dire qui s'écoule entre l'instant où liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise et fin de prise.

II.6.4.2 Mode Opératoire (Détermination des Temps de Prise)

Cet essai s'effectue obligatoirement sur une pâte à consistance normale (déterminée lors de l'étape précédente). EN 196-3 [53]

II.6.4.3 Préparation et Equipment

- Appareil de Vicat équipé cette fois de l'aiguille fine (section $1,13 \text{ mm}^2$).
- Moule tronconique rempli de pâte normale.
- Armoire humide (température $20^\circ\text{C} \pm 1$ et humidité $> 90\%$).
- Chronomètre.



Figure II.25. Appareil de Vicat



Figure II.26. Moule tronconique

II.6.4.5 Procédure Expérimentale :

Étape 1 : Initialisation

1. Le temps t_0 (origine des temps) correspond à l'instant précis où le ciment a été mis en contact avec l'eau de gâchage.
2. Une fois le moule rempli et arasé, placez-le immédiatement dans l'armoire humide sur sa plaque de base.



Figure II.27. Plaque de base

Étape 2 : Mesure du Début de Prise

1. Sortez le moule de l'armoire quelques instants avant la mesure.
2. Amenez l'aiguille de Vicat au contact de la surface de la pâte.
3. Relâchez l'aiguille et observez son enfoncement.
4. Répétez l'opération à intervalles réguliers (toutes les 5 ou 10 minutes près du temps supposé).
 - ✓ **Attention** : Chaque enfoncement doit se faire à au moins 10 mm du bord du moule et des points de mesure précédents.
5. Nettoyez l'aiguille après chaque essai.

Étape 3 : Mesure de la Fin de Prise

1. L'essai se poursuit jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus que de manière superficielle (quelques fractions de millimètre).
2. La fin de prise est atteinte quand l'aiguille ne laisse plus qu'une trace insignifiante sur la surface et ne pénètre plus visiblement la pâte.

II.6.4.6 Expression des résultats

Etape	Condition d'arrêt	Définition du temps
Début de prise	L'aiguille s'arrête à $4 \text{ mm} \pm 1$ du fond (plaque de base).	Temps écoulé entre t_0 et ce moment précis.
Fin de prise	L'aiguille ne pénètre plus dans la pâte (enfoncement 0 mm).	Temps écoulé entre t_0 et ce moment précis

II.6.5 Essai d'expansion**II.6.5.1. Objectif de l'essai**

L'essai d'expansion a pour but de vérifier la stabilité de volume du ciment après hydratation. Il permet de détecter une présence excessive de chaux libre (CaO_L) ou de magnésie (MgO), dont l'hydratation tardive provoque un gonflement susceptible de fissurer les ouvrages. **EN 196-3 [53]**

II.6.5.2. Équipement requis

- Moules Le Chatelier : Cylindres fendus en laiton (diamètre 30 mm, hauteur 30 mm) munis de deux aiguilles de 150 mm
- Plaques de verre.
- Bain-marie avec dispositif de chauffage.
- Armoire humide (HR > 90 %, T = 20 ± 1°C).
- Règle millimétrique.

II.6.5.3 Procédure expérimentale

1. Préparation et Moulage

1. Préparer une pâte de ciment à consistance normale.
2. Placer le moule Le Chatelier sur une plaque de verre légèrement huilée.
3. Remplir le moule avec la pâte en une seule fois, sans tassement excessif mais en s'assurant de l'absence de bulles d'air.
4. Araser la surface à l'aide d'une truelle et recouvrir d'une seconde plaque de verre.



Figure II.28. Moule Le Chatelier remplie mesure L1

2. Conservation Initiale

1. Placer l'ensemble (moule et plaques) dans l'armoire humide pendant 24 heures.
2. À l'issue de ce délai, mesurer l'écartement initial entre les pointes des aiguilles (L_1 , en mm).



Figure II.29. Placer l'ensemble dans l'armoire humide

3. Immersion et Ébullition

- Immerger le moule dans le bain-marie à température ambiante.

- Porter l'eau à ébullition (100 °C) en 30 ± 5 minutes.
- Maintenir l'ébullition de manière continue pendant 3 heures.
- Retirer le moule du bain et le laisser refroidir à température ambiante.



Figure II.30. Immerger le moule dans le bain-marie

4. Mesure Finale

Mesurer l'écartement final entre les pointes des aiguilles (L_2 , en mm)



Figure II.31. Mesurer l'écartement final L_2

II.6.5.4 Expression des résultats

L'expansion est calculée par la différence entre les deux mesures :

$$E = L_2 - L_1$$

✓ **E** : Valeur de l'expansion (en mm).

✚ **Critère de conformité** : Pour la majorité des ciments courants, l'expansion doit être inférieure ou égale à 10 mm. Si cette valeur est dépassée, le ciment est considéré comme instable.

II.7 Essais de Résistance Mécanique (Flexion et Compression)

II.7.1 Objectif de l'essai

Déterminer les résistances à la flexion et à la compression du mortier normal à des échéances précises (2, 7 et 28 jours). Ces valeurs permettent de classer le ciment selon sa classe de résistance (ex : 32.5, 42.5 ou 52.5) MPa. EN 196-1/NA 443 [47] [54]

II.7.2 Équipement et Consommables

- Malaxeur normalisé à deux vitesses (lente et rapide).
- Moules métalliques de dimensions (4 X 4 X 16) cm.

- Table à chocs pour le compactage.
- Sable normalisé (1350 g par gâchée).
- Ciment (450 g).
- Eau distillée (225 ml), soit un rapport E/C = 0,5.
- Machine d'essais universelle (Presse de compression et dispositif de flexion).



Figure II.32. Équipement pour préparation du Mortier

II.7.3 Préparation du Mortier Normalisé

1. Malaxage

Le respect de l'ordre d'introduction est crucial pour l'homogénéité :

- Verser l'eau dans la cuve du malaxeur, puis ajouter le ciment.
- Démarrer en vitesse lente pendant 30 secondes.
- Introduire le sable régulièrement durant les 30 secondes suivantes (toujours en vitesse lente).
- Passer en vitesse rapide pendant 30 secondes.
- Arrêter le malaxeur pendant 90 secondes. Durant les 30 premières secondes, racler les parois de la cuve avec une spatule pour ramener le mélange au centre.
- Reprendre le malaxage en vitesse rapide pendant 60 secondes (soit 1 minute).



Figure II.33. Malaxage

2. Mise en moule et Compactage

- Introduire le mortier dans le moule (4 X 4 X 16) cm en deux couches successives.

- b) Fixer le moule sur la table à chocs et appliquer 60 chocs à chaque couche pour assurer un serrage optimal.
- c) Râcler l'excédent de mortier à la surface avec une règle métallique pour obtenir une finition plane.



Figure II.34. Mise en moule et Compactage

3. Conservation

- a) Placer les moules en chambre humide ($20 \pm 1^\circ\text{C}$, HR > 90 %) pendant 24 heures.
- b) Après 24h, procéder au démoulage.
- c) Immerger les éprouvettes dans un bac d'eau à 20°C jusqu'à l'échéance de l'essai (2, 7 ou 28 jours).



Figure II.35. Conservation

II.7.4 Réalisation des Essais de Rupture



Figure II.36. Machine d'essai mécanique

II.7.4.1 Essai de Flexion

L'éprouvette est placée sur deux appuis distants de 100 mm Une charge est appliquée au centre jusqu'à la rupture.

La résistance à la flexion (R_f) est calculée sur l'éprouvette entière. NA 428 [55]



Figure II.37. Essai de Flexion

II.7.4.2 Essai de Compression

Après la rupture en flexion, les deux "demi-prismes" obtenus sont récupérés pour l'essai de compression.

1. Placer le demi-prisme entre les plateaux de la presse (surface d'appui de 4 X 4 cm).
2. Appliquer la charge de manière continue jusqu'à l'écrasement complet.



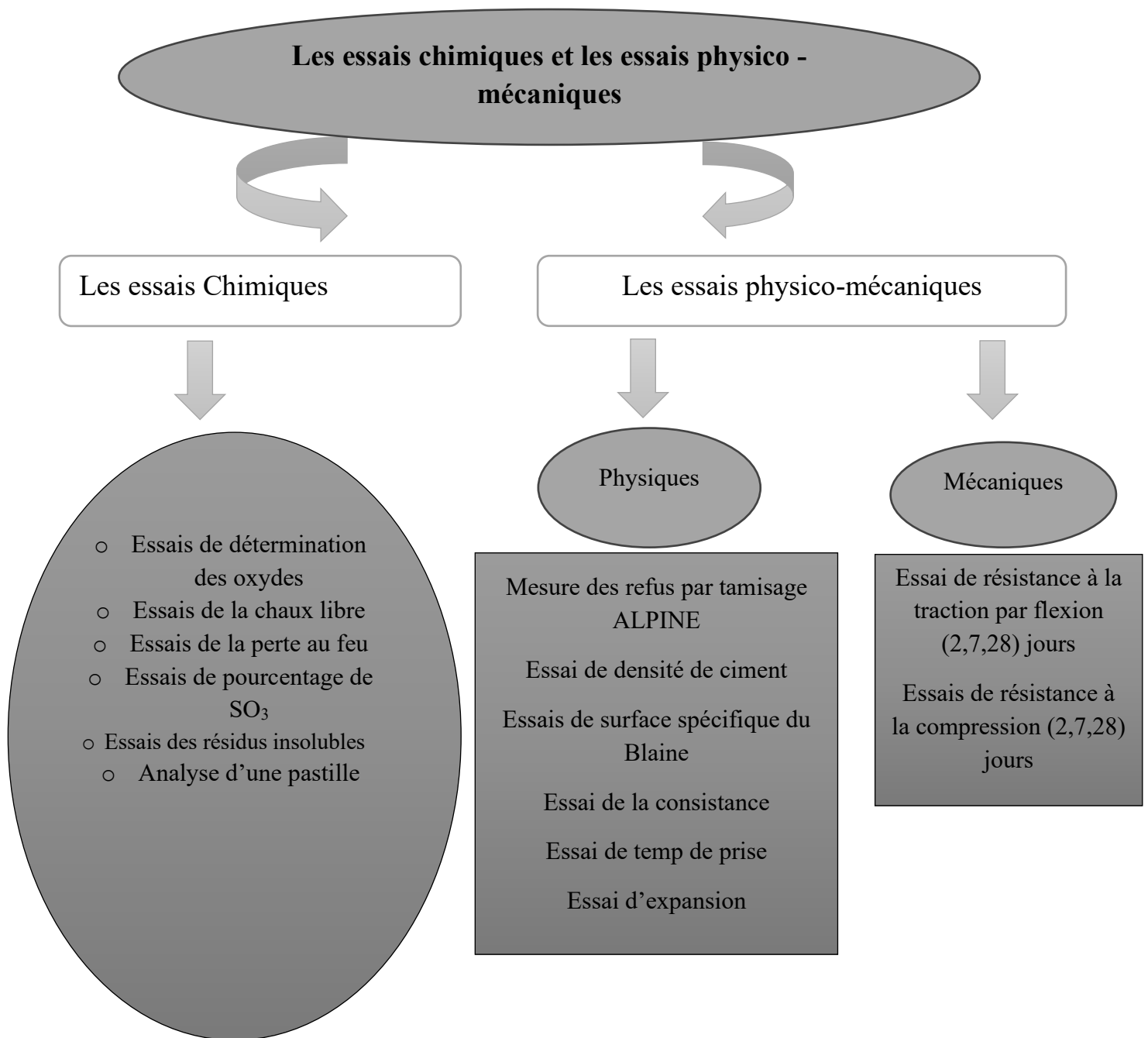
Figure II.38. Essai de Compression

II.7.5 Expression des Résultats

La résistance est exprimée en Mégapascals (MPa) :

- **Compression** : $RC = F/A$ (où F est la force de rupture et $A = 1600 \text{ mm}^2$).

II.8 Conclusion





Chapitre III :

Résultats et discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus au cours de l'étude expérimentale ainsi que leur interprétation. Dans un premier temps, l'analyse a porté sur l'influence de la granulométrie du ciment, exprimée par le refus au tamis de 45 μm , sur ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. Dans un second temps, une étude complémentaire a été menée afin d'exploiter la réserve en résistance observée, à travers l'optimisation de la formulation du ciment, notamment par l'ajustement du taux d'ajout. Ces résultats permettront de mieux évaluer l'influence de ces paramètres sur la qualité et les performances du ciment produit.

III.2 Analyse chimiques des constituants du ciment

III.2.1 La composition chimique de gypse

Tableau III.1. La composition chimique de gypse

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Gypse	6,05	1,07	0,39	29,03	0,6	0,15	0,08	38,68

III.2.2 La composition chimique de pouzzolane

Tableau III.2. La composition chimique de pouzzolane

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Pouzzolane	44,60	17,90	10,40	9,50	3,80	1,20	2,60	0,01

III.2.3 La composition chimique de clinker

Le tableau suivant représente l'analyse chimique du clinker constituant principale du ciment utilisé pour notre expérience:

Tableau III.3. La composition chimique du clinker

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PF	CaO _L
Pourcentage (%)	21.35	5.66	3.65	65.93	1.08	0.41	0.31	0.48	0.50	0.63

III.2.4 La composition minéralogique de clinker

La composition minéralogique du clinker est définie par les formules suivantes (Formules de BOGUE) calculée à partir de la composition chimique du clinker (proportion des oxydes) .

Silicate Tricalcique ou Phase Alite : $C_3S = 4,07 \times CaO - 7,6 \times SiO_2 - 6,72 \times Al_2O_3 - 1,43 \times Fe_2O_3$

Silicate Bicalcique ou Phase Belite : $C_2S = 2,87 \times SiO_2 - 0,75 \times C_3S$

Aluminate Tricalcique ou Célide : $C_3A = 2,65 \times Al_2O_3 - 1,69 \times Fe_2O_3$

Alumino-Ferrite Trétracalcique : $C_4AF = 3,04 \times Fe_2O_3$

Tableau III.4. La composition minéralogique du clinker .

Constituants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
La composition %	62.82%	14.15%	8.83%	11.09%

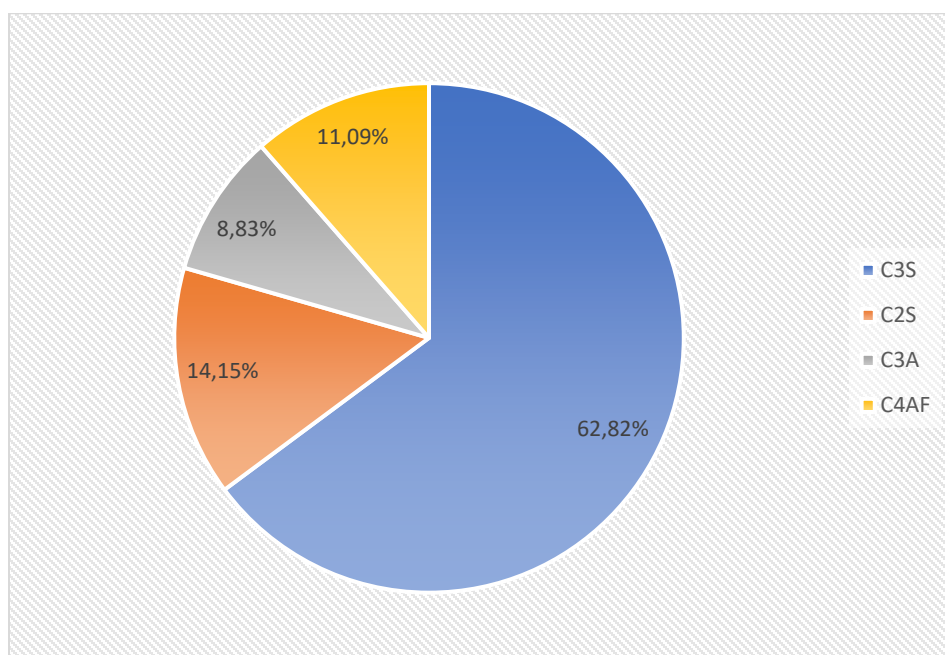


Figure III.1. La composition minéralogique du clinker

Le clinker est principalement composé de C₃S, suivi de C₂S. La forte teneur en C₃S favorise le développement des résistances mécaniques aux jeunes âges, tandis que le C₂S contribue aux résistances à long terme. La présence modérée de C₃A et C₄AF reste conforme à un clinker industriel normal.

III.3 Caractérisation du Ciment à (8% d' Ajout Pouzzolane (étude 01))

III.3.1-Refus par tamisage

Tableau III.5. Synthèse des refus mesurés sur les échantillons préparés

Echantillon	N° Essai	Masse initiale M_0 (g)	Masse du refus M_1 (g)	Refus à 45 μm (%)	Moyenne du Refus à 45 μm (%)
E1	N°1	25.00	6,26	25,04	24.98
	N°2	25.00	6,23	24,92	
E2	N°1	25.00	4,98	19,92	19.88
	N°2	25.00	4,96	19,84	
E3	N°1	25.00	3,76	15,04	14.98
	N°2	25.00	3,73	14,92	
E4	N°1	25.00	2,52	10,08	10.02
	N°2	25.00	2,49	9,96	
E5	N°1	25.00	1,24	4,96	5.02
	N°2	25.00	1,27	5,08	

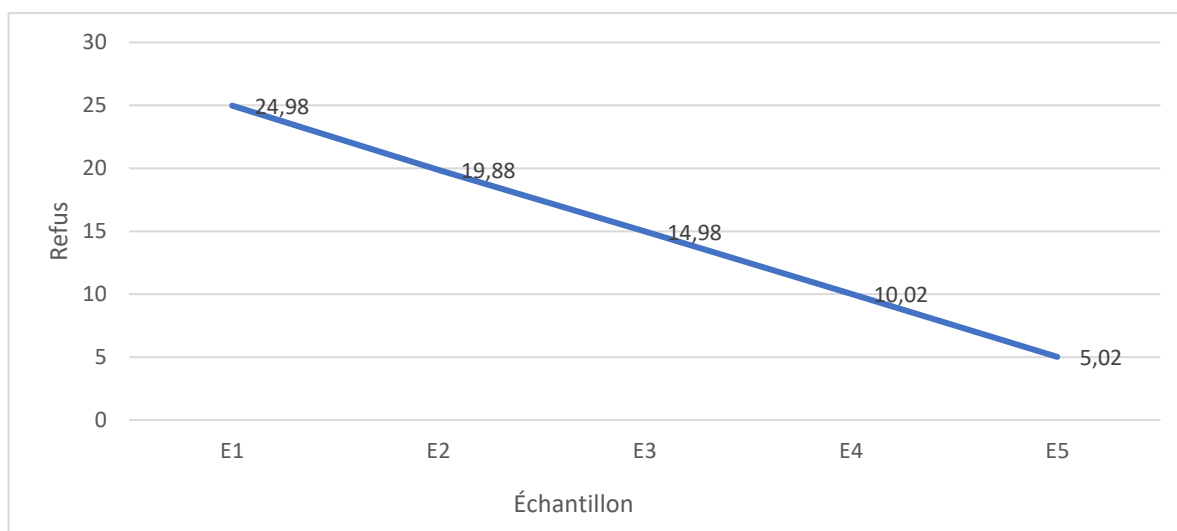


Figure III.2. Echantillon en fonction de refus

Une diminution progressive du pourcentage de refus de l'échantillon E1(25%) vers E5(5%). Cette diminution traduit une augmentation significative de la fraction fine du ciment. Plus le refus diminue, plus la proportion des particules fines augmente.

III.3.2 Résultats d'analyse chimique des échantillons

III.3.2.1 Perte au Feu (PF)

Tableau III.6. Résultats de la perte au feu (PF)

Echantillons	Refus (%)	P1 (g)	P2 (g)	Résultat PF (%)
E1	25	14,5777	14,5560	2,17
E2	20	14,5779	14,5561	2,18
E3	15	13,1329	13,1108	2,21
E4	10	13,1316	13,1075	2,41
E5	5	13,1309	13,1066	2,43

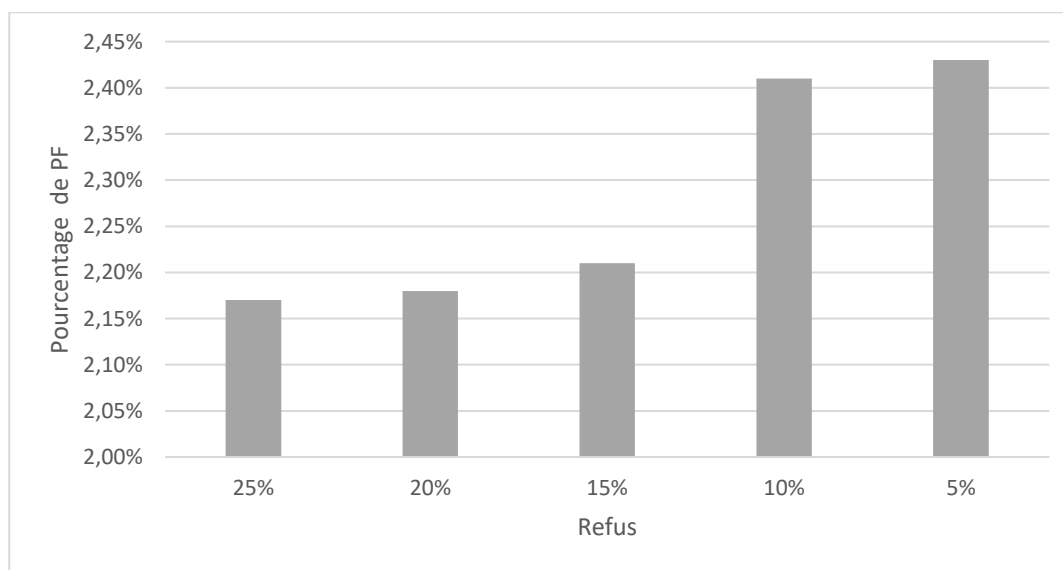


Figure III.3. La perte au feu en fonction du taux de refus

On constate une légère augmentation de la perte au feu lorsque le pourcentage de refus diminue. Cette évolution s'explique par la finesse plus élevée des particules, qui augmente leur surface spécifique et favorise la rétention d'une faible quantité d'humidité ou de matières volatiles. Cependant, cette variation reste limitée, ce qui montre que les échantillons conservent une bonne

stabilité. Ainsi, la finesse a un effet mineur sur la perte au feu et n'affecte pas de manière significative la qualité globale du ciment.

III.3.2.2. Résidu insoluble (RI)

Le tableau 3.5 représente le taux des résidus insoluble des échantillons E3 et E5 :

Le résidu insoluble correspond à la fraction du ciment qui ne se dissout pas lors d'une attaque chimique, Il permet d'évaluer la quantité de composants inertes

Tableau III.7. Résultat de Résidue insoluble

Echantillons	Refus (%)	P1 (g)	P2 (g)	Résultat RI (%)
E3	15	37,5082	37,5695	6,13
E5	5	37,5067	37,5630	5,63

Une diminution du taux de résidu insoluble (de 6,13% à 5,63%) lorsque la finesse du ciment augmente (passage d'un refus de 15% à 5%)

Cette baisse s'explique par le fait qu'un broyage plus poussé réduit la taille des particules facilitant ainsi la dissolution des phases. Un taux de RI plus faible pour l'échantillon le plus fin (E5) suggère une meilleure homogénéité du mélange et une réactivité potentielle accrue.

III.3.3 Analyse Chimiques Par fluorescence des RX

Les résultats obtenus qui correspondent à chaque échantillon sont affichés dans le tableau suivants :

Tableau III.8. Analyses par fluorescence de RX des échantillons de ciment

Echantillon Oxyde	E1: 25%	E2 : 20%	E3 : 15%	E4 : 10%	E5 : 5%
SiO ₂	24,47	24,90	25,03	25,11	25,14
Al ₂ O ₃	4,95	5,01	5,03	5,06	5,03
Fe ₂ O ₃	3,23	3,23	3,24	3,23	3,21
CaO	59,36	59,42	59,28	59,18	58,91
MgO	0,87	0,90	0,91	0,90	0,90
K ₂ O	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46

Na₂O	0,34	0,34	0,35	0,35	0,34
SO₃	2,38	2,42	2,46	2,48	2,26

L'analyse par fluorescence de RX montre que la variation de la finesse du ciment n'entraîne pas de modification significative de sa composition chimique. Les légères fluctuations observées au niveau des oxydes majeurs (SiO₂, CaO) et des sulfates (SO₃) restent limitées et s'expliquent principalement par des effets de dispersion granulométrique et d'homogénéisation des constituants. Ces résultats confirment la stabilité du procédé de fabrication et la conformité chimique des différents échantillons.

III.3.4 Résultats des essais physiques

III.3.4.1 Surface spécifique Blaine (SSB)

Le tableau suivant donne les surfaces spécifiques de Blaine des différents échantillons

Tableau III.9. Résultats de l'essai de Blaine des différents échantillons de ciment

Echantillons	Refus (%)	Blaine (cm²/g)
E1	25	3523,73
E2	20	3809,89
E3	15	4181,00
E4	10	4619,05
E5	5	5452,53

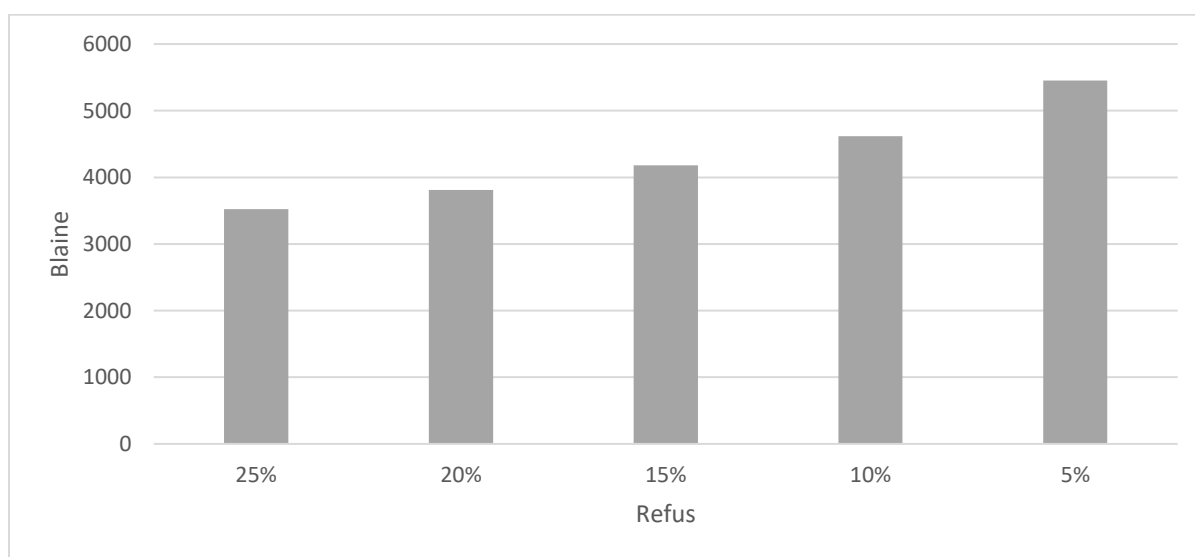


Figure III.4. La surface spécifique du Blaine par rapport au refus

La SSB augmente de 3523 à 5452 cm²/g à mesure que le refus diminue. Cette augmentation est le garant d'une réactivité chimique accrue.

III.3.4.2 La densité

Le tableau suivant donne les densités des différents échantillons :

Tableau III.10. Résultats de la densité des différents échantillons de ciment

Echantillons	Refus (%)	Densité
E1	25	1050,1
E2	20	1026,15
E3	15	1007,8
E4	10	887,2
E5	5	886,35

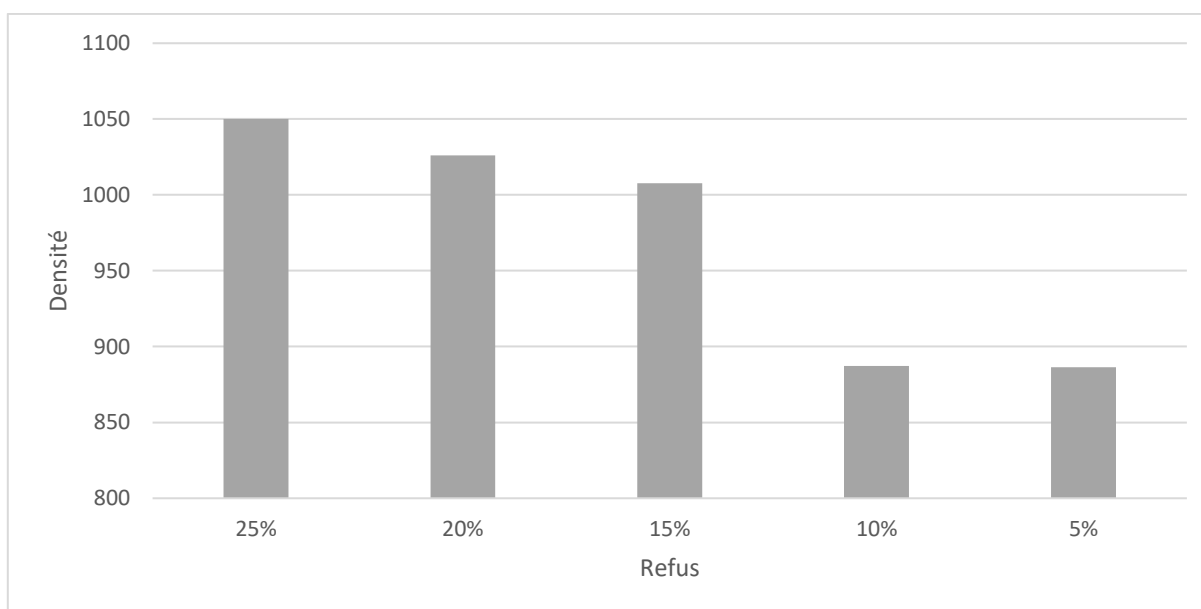


Figure III.5. Variation de la densité en fonction du refus

Une diminution de la densité apparente (1050,1 vers 886,35).

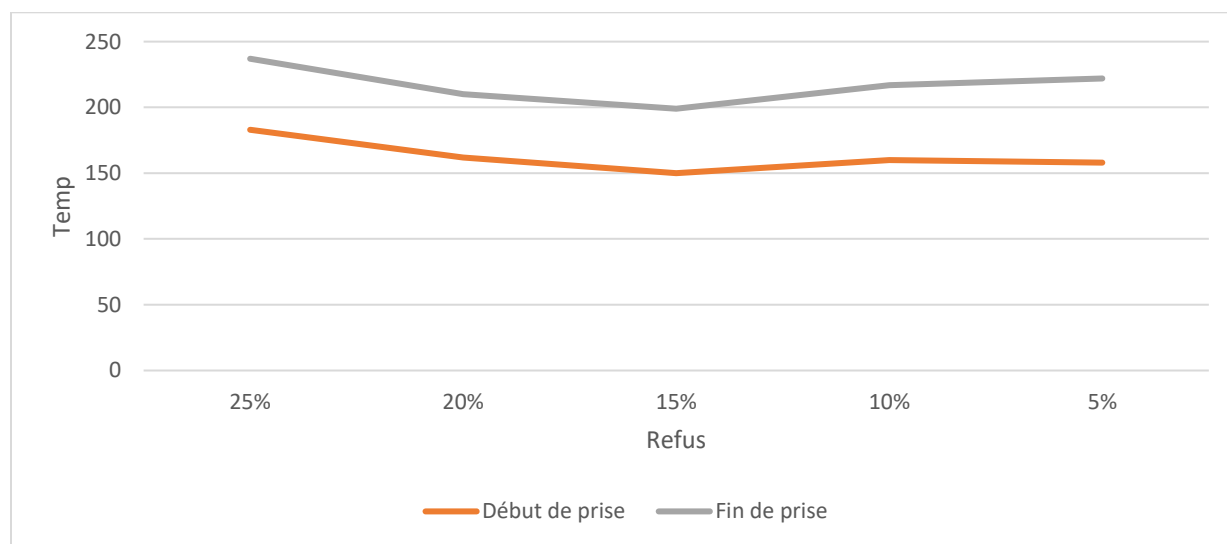
Ce phénomène s'explique par l'augmentation du volume spécifique de la poudre. Un ciment très fin emprisonne davantage d'air, ce qui réduit sa densité apparente à l'état non tassé.

III.3.4.3 La consistance normale, temps de début et fin de prise et expansion

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant

Tableau III.11. Résultat La consistance normale, temps de début et fin de prise et expansion

Echantillons	Refus (%)	Eau de consistance (ml)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Expansion (mm)
E1	25	129ml 5mm	183	237	0
E2	20	120ml 5mm	162	210	0
E3	15	124.5ml 5mm	150	199	0
E4	10	125.8ml 5mm	160	217	0
E5	5	122ml 5mm	158	222	0

**Figure III.6.** Evolution du temps de prise en fonction du refus

La finesse influence modérément les temps de début et de fin de prise. Bien qu'elle accélère généralement l'hydratation, les variations observées restent dans les plages normatives sans impact significatif sur le comportement global du ciment.

○ Expansion

On remarque qu'il n'y a pas de différence entre les différents échantillon et l'expansion est nulle.

III.3.5 Résultats des essais mécaniques

III.3.5.1 Résistance à la flexion

Les résultats des résistances à la flexion à 2, 7, et 28 jours est donné par le tableau suivant :

Tableau III.12. Résultats de la résistance à la flexion

Echantillons	Refus (%)	flex 2j (MPa)	flex 7j (MPa)	flex 28j (MPa)
E1	25	3,69	5,80	7,60
E2	20	3,93	6,18	7,82
E3	15	4,20	5,68	8,52
E4	10	4,40	6,45	7,73
E5	5	5,13	7,23	7,87

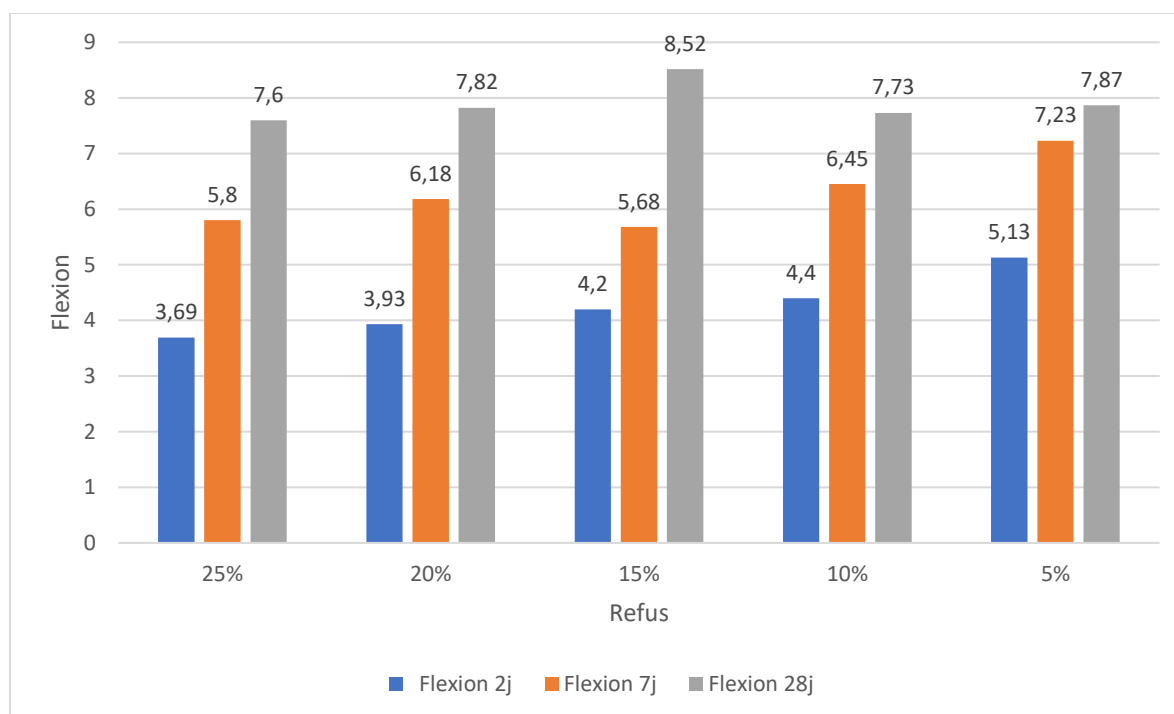


Figure III.7. Résistance à la flexion en fonction de refus

Les résultats de la résistance à la flexion montrent une amélioration globale des performances mécaniques avec la diminution du refus au tamis de 45 μm , traduisant une augmentation de la finesse du ciment. Cette influence est particulièrement marquée aux jeunes âges (2 et 7 jours), où l'hydratation est accélérée grâce à une surface spécifique plus élevée. À 28 jours, les écarts entre les échantillons deviennent moins significatifs, indiquant que l'effet de la finesse s'atténue avec le temps. Ainsi, la finesse constitue un paramètre clé pour le développement des résistances initiales du ciment.

III.3.5.2 Résistance à la compression

Tableau III.13. Résultats des résistances mécaniques des échantillons de ciment

Echantillons	Refus (%)	Comp 2j (MPa)	Comp 7j (MPa)	Comp 28j (MPa)
E1	25	18,56	31,2	46,5
E2	20	19,40	34,6	50,85
E3	15	20,55	37,85	49,15
E4	10	22,85	42,4	52,45
E5	5	25,2	41,7	54,45

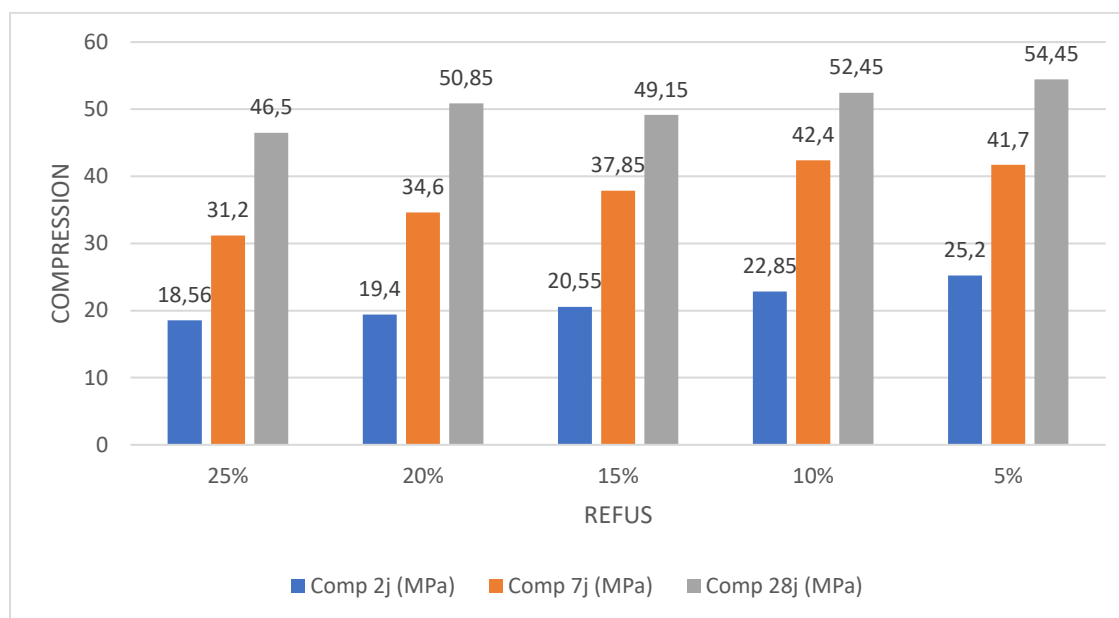


Figure III.8. Variation de la résistance à la compression en fonction du refus

Les résultats des essais de compression montrent une augmentation significative des résistances mécaniques avec la diminution du refus au tamis de 45 μm , traduisant une amélioration de la finesse du ciment. Cette influence est particulièrement marquée à jeune âge, où la finesse favorise une hydratation rapide et une formation accélérée des produits hydratés.

On constate que la résistance à 2 jours augmente lorsque le pourcentage de refus diminue. Cette évolution s'explique par l'augmentation de la finesse du ciment, qui accélère l'hydratation du clinker (notamment le C_3S), et favorise une formation rapide des hydrates (C-S-H), qui est à l'origine des fortes améliorations des résistances précoces (résistances aux jeunes âges).

À 7 jours, la résistance continue d'augmenter avec la diminution du refus. Cela confirme que la finesse du ciment joue un rôle positif sur le développement progressif des résistances mécaniques. À 28 jours, les résistances restent plus élevées pour les ciments les plus fins, bien que les écarts tendent à se réduire. Ainsi, la finesse constitue un paramètre clé dans l'optimisation des performances mécaniques du ciment.

III.4 Impact de la granulométrie sur le ciment (8 % de pouzzolane)

L'étude expérimentale menée sur le ciment à 8 % de pouzzolane met en évidence l'influence prépondérante de la finesse de mouture sur l'ensemble des caractéristiques du liant. Les conclusions majeures de cette série d'essais sont les suivantes :

- **Réactivité Physico-Chimique** : La réduction du refus au tamis de $45\ \mu\text{m}$ de 25 % à 5 % s'accompagne d'une augmentation de la surface spécifique de Blaine, qui passe de 3523 à 5452 cm^2/g . Cette évolution favorise une meilleure dissolution des phases minéralogiques, comme le confirme la diminution du résidu insoluble de 6,13 % à 5,63 %.
- **Cinétique d'Hydratation** : Bien que la finesse influence modérément les temps de prise, elle modifie sensiblement la structure physique du ciment en augmentant son volume spécifique, ce qui se traduit par une baisse de la densité apparente.
- **Performances Mécaniques** : L'impact le plus significatif est observé sur les résistances à la compression, particulièrement aux jeunes âges. L'échantillon le plus fin (E5) affiche un gain de performance de près de 35 % à 2 jours par rapport à l'échantillon le plus grossier. À 28 jours, les résistances atteignent un palier élevé de 54,45 MPa, confirmant que la finesse est un levier efficace pour optimiser le potentiel hydraulique du clinker (riche en C3S à 62,82 %).

III.5 Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude montrent clairement que la finesse de broyage exerce une influence significative sur les propriétés physico-mécaniques du ciment. La diminution du refus au tamis $45\ \mu\text{m}$ entraîne une augmentation de la surface spécifique du ciment, ce qui favorise les réactions d'hydratation et améliore le développement des résistances mécaniques.

Les résistances obtenues, notamment à 28 jours, montrent que les ciments les plus fins présentent des performances mécaniques supérieures. Une réserve de résistance d'environ 8 MPa a été observée.

Perspectives et prolongement de l'étude

Les résultats obtenus ouvrent la voie à des travaux complémentaires visant à approfondir l'influence combinée de la finesse de broyage et du taux de substitution du clinker par la pouzzolane ainsi que leur contribution à la réduction de l'empreinte de carbone de l'industrie cimentière.



Chapitre IV :

Etude Complémentaire

IV.1 Optimisation par Ajout de Pouzzolane (Échantillons EP3 et EP5)

IV.1.1 Objectif de l'étude

L'objectif est de quantifier l'influence de l'ajout de pouzzolane naturelle sur les performances du ciment. Il s'agit de vérifier le gain de résistance mécanique observé tout en respectant les limites de la norme CEM II/A-P 42,5N (6 % à 20 % d'ajouts).

IV.1.2 Justification du choix des échantillons

Dans le cas de la cimenterie étudiée (SCIBS), où le ciment contient actuellement 8% de pouzzolane, il serait intéressant d'envisager une augmentation de ce taux à 20%, en s'appuyant sur les résultats obtenus pour des finesses correspondant à des refus au tamis 45µm de 5% et 15%.

Les essais ont été recentrés sur deux points de contrôle critiques : un refus de 15 % (proche du standard industriel) et un refus de 5 % (finesse optimisée).

Cette approche permettrait d'évaluer les possibilités de réduction du taux du clinker tout en maintenant des performances conformes aux exigences normatives.

IV.1.3 Procédure de préparation

IV.1.3.1 Préparation de la Pouzzolane

1. **Séchage** : Peser la masse initiale de pouzzolane humide. Placer l'échantillon à l'étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
2. **Broyage** : Broyer la pouzzolane séchée jusqu'à l'obtention d'une poudre fine.
3. **Contrôle de finesse** : Vérifier le refus pour s'assurer que la granulométrie de la pouzzolane est cohérente avec celle du ciment de base.

IV.1.3.2 Formulation des mélanges (Échantillons EP3 et EP5)

Pour chaque préparation, le mélange est dosé comme suit :

$$100 \times 0,08 + m = (100 + m) \times 0,2$$

m : masse de pouzzolane ajoutée

- Ciment de base qui contient 8% de pouzzolane : 1000 g.
- Ajout de Pouzzolane : 150 g (pour atteindre un taux d'ajout total de 20 %).
- **Homogénéisation** : Mélanger à sec pendant au moins 30 minutes pour garantir une répartition parfaite de l'ajout.



Figure IV.1. Pouzzolane broyée
IV.1.3.3 Analyses et Caractérisation



Figure IV.2. Ciment à 20% de Pouzzolane

1. Analyses Mécaniques

1. Confection du mortier : Préparer les éprouvettes (4*4*16) cm selon la méthode du mortier normalisé.
2. Observation de l'ouvrabilité : Noter toute baisse de maniabilité.
 - ✓ Note : Ne pas ajouter d'eau supplémentaire pour maintenir la validité de la comparaison.
3. Cure des éprouvettes : Maintenir les éprouvettes en immersion totale dans une eau à 20 ± 1 °C. La réaction pouzzolanique étant lente, la précision de la température est fondamentale pour les résistances à long terme (28 jours).

2. Analyses Chimiques

- Perte au Feu (PAF) : Déterminer la teneur en matières volatiles sur les échantillons EP3 et EP5.
- Résidus Insolubles (RI) : Évaluer la fraction de l'ajout qui n'a pas réagi chimiquement.

3. Analyse par Fluorescence X (FX)

Cette analyse permet de déterminer la composition élémentaire exacte (oxydes) des nouveaux mélanges.

1-Préparation des pastilles

- ✓ Prendre une quantité précise de l'échantillon EP3 ou EP5 (poudre fine).

- ✓ Mélanger éventuellement avec un liant si nécessaire.
- ✓ Compresser la poudre sous une pression élevée (presse hydraulique) pour obtenir une pastille rigide et homogène.

2-Mesure

Introduire la pastille dans le spectromètre à Fluorescence X pour quantifier les concentrations en SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , etc.

IV.2. Résultats sur un ciment avec (20 % d'ajout pouzzolane)

IV.2.1 Objectif de l'Étude Complémentaire

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact de la finesse sur les performances mécaniques, cette analyse complémentaire vise à exploiter la réserve de résistance identifiée lors de l'étude à 8 % d'ajout. L'objectif est de vérifier si une augmentation de la finesse de mouture peut compenser l'effet de dilution du clinker provoqué par l'augmentation du taux de pouzzolane à 20 %.

IV.2.2 Analyse de la Finesse

Les essais ont été recentrés sur deux points de contrôle critiques : un refus de 15 % (proche du standard industriel) et un refus de 5 % (finesse optimisée).

IV.2.2.1 Refus par tamisage

Tableau IV.1. Synthèse des refus mesurés sur les échantillons préparés

Echantillon	N° Essai	Masse initial M_0 (g)	Masse du refus M_1 (g)	Refus à 45 μm (%)	Moyenne du Refus à 45 μm (%)
EP3	N°1	25.00	3,71	14,84	14,9$\approx$ 15
	N°2	25.00	3,74	14,96	
EP5	N°1	25.00	1,245	4,98	5,01$\approx$ 5
	N°2	25.00	1,26	5,04	

Les échantillons Ep3 (14,9%) et Ep5 (5,01%) confirment la maîtrise du broyage pour cette nouvelle série.

IV.2.3. Résultats d'analyse chimique

IV.2.3.1 Perte au feu

Le tableau 4.2 représente les résultats de la perte au feu de deux échantillons Ep3 et Ep5 et la pouzzolane :

Tableau IV.2. Perte au Feu (PF)

Echantillons	P1 (g)	P2 (g)	Résultat PF (%)
Pouzzolane	13,1337	13,0308	10,29
Ep3	13,1338	13,0996	3,42
Ep5	14,5420	14,5036	3,84
E3	13,1329	13,1108	2,21
E5	13,1309	13,1066	2,43

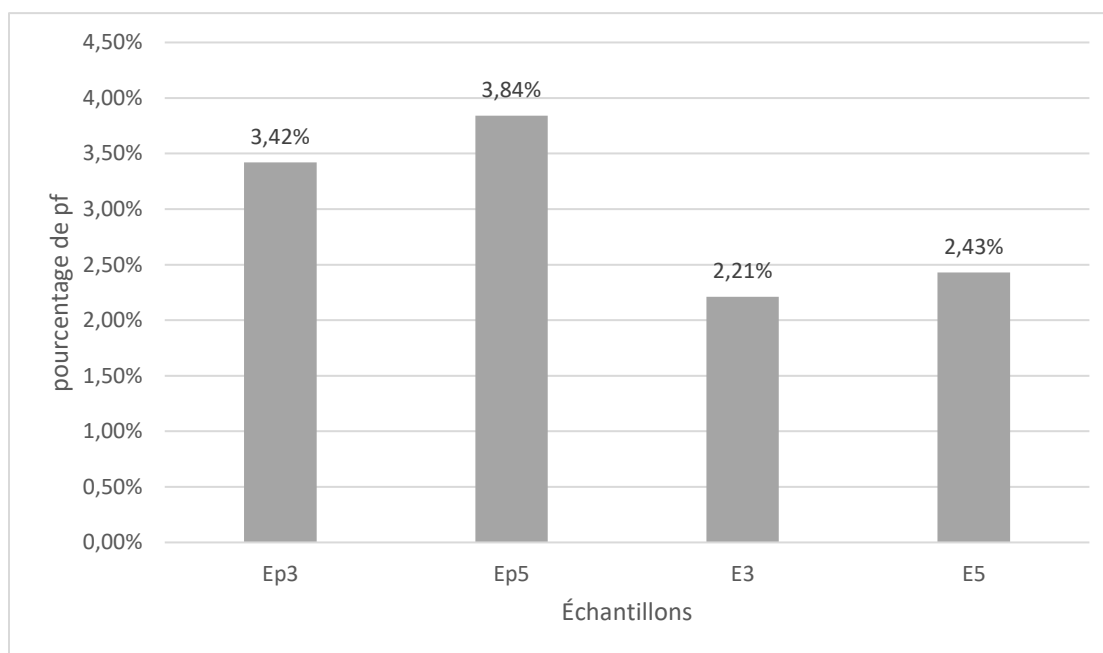


Figure IV.3. Pert au feu des échantillons E3, EP3 et E5, EP5.

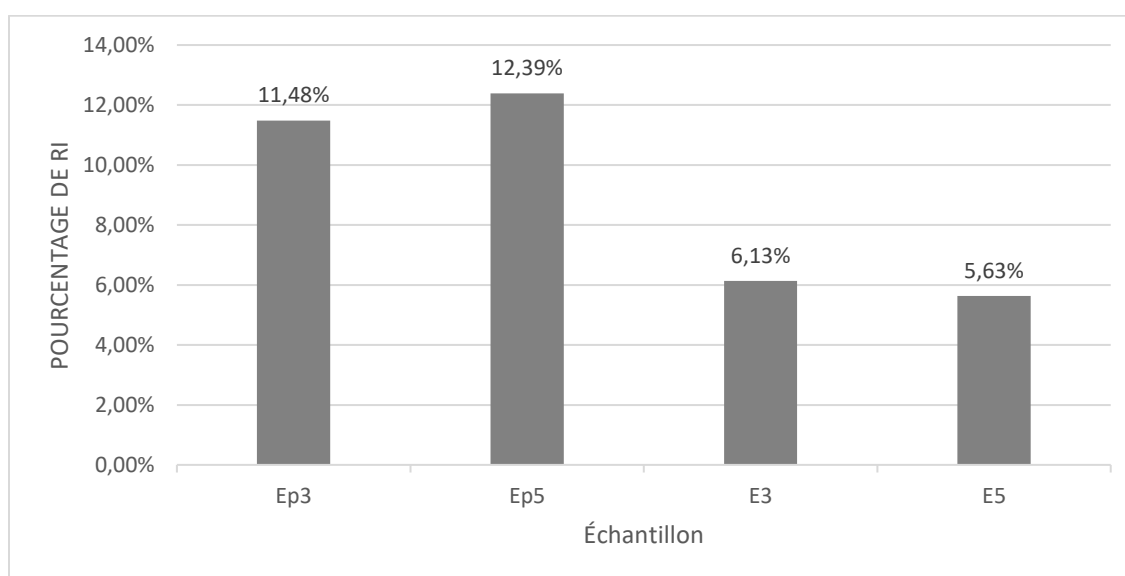
L'augmentation de la perte au feu observée avec l'accroissement du taux de pouzzolane s'explique par le caractère naturel de cet ajout minéral. En effet, la pouzzolane contient de l'humidité résiduelle, de l'eau liée, des substances argileuses ainsi que des carbonates. Lors de la calcination, la libération de l'eau liée, la déshydroxylation des minéraux argileux et la décomposition des carbonates entraînent une perte de masse plus importante.

IV.2.3.2 Résidue insoluble

Le tableau 4.3 représente les résultats de pourcentage de la Résidue insoluble de deux échantillons Ep3 et Ep5 :

Tableau IV.3. Résultats de le Résidu insoluble

Echantillons	Refus (%)	P1 (g)	P2 (g)	Résultat RI (%)
Ep3	15	37,5077	37,6225	11,48
Ep5	5	80,2703	80,3942	12,39
E3	15	37,5082	37,5695	6,13
E5	5	37,5067	37,5630	5,63

**Figure IV.4.** Résidu insoluble des échantillons E3 ,EP3 et E5 ,EP5 .

Une augmentation du résidu insoluble est observée pour les échantillons EP3 et EP5. Cette évolution est liée à la teneur plus élevée en pouzzolane dans le ciment utilisé. En effet, la pouzzolane contient une proportion importante de constituants insolubles dans les acides, notamment des phases siliceuses et aluminosilicatées. Par conséquent, l'accroissement du taux de substitution du clinker par la pouzzolane entraîne une augmentation de la teneur en résidu insoluble.

IV.2.4 Analyse Par fluorescence des RX

Les résultats obtenus qui correspondent à chaque échantillon et l'ajout (pouzzolane et gypse) sont affichés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.4. Les analyses chimiques par fluorescence de RX

Ech \ Oxyd	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃
EP3	28,55	6,23	3,67	54,91	1,18	0,55	0,33	2,09
EP5	28,77	6,32	3,74	54,11	1,18	0,56	0,32	1,86
E3	25,03	5,03	3,24	59,28	0,91	0,47	0,35	2,46
E5	25,14	5,03	3,21	58,91	0,90	0,46	0,34	2,26

Une augmentation du taux de pouzzolane de 8 % à 20 % se traduit par une hausse de la teneur en SiO₂ et une diminution de la teneur en CaO. Cette évolution de la composition chimique reflète l'augmentation du taux de substitution du clinker par la pouzzolane, un matériau naturellement plus riche en silice et plus pauvre en chaux.

IV.2.5 Résultats des essais mécaniques

IV.2.5.1 Résistance à la flexion

Les résultats des résistances à la flexion à 2, 7, et 28 jours est donné par le tableau suivant :

Tableau IV.5. Résistances à la flexion des échantillons Ep3,Ep5 Par rapport à E3 et E5

Echantillons	Refus (%)	flex 2j (MPa)	flex 7j (MPa)	flex 28j (MPa)
Ep3	15	3,65	5,51	7,54
Ep5	5	4,26	6,08	6,89
E3	15	4,20	5,68	8,52
E5	5	5,13	7,23	7,87

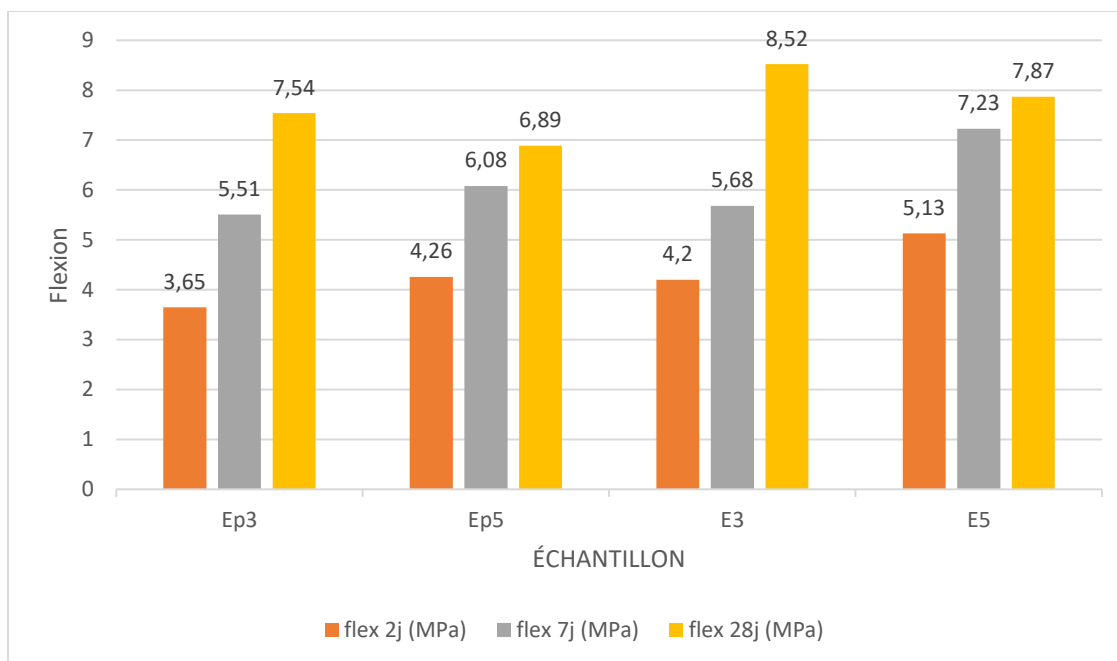


Figure IV.5. Comparaison des résistances à la flexion des échantillons E3 ,EP3 et E5 ,EP5 . L'ajout de 20 % de pouzzolane provoque une légère baisse des résistances à la flexion par rapport aux échantillons initiaux. Cependant, les valeurs restent satisfaisantes. L'échantillon EP5 (refus 5%) présente les meilleures performances, ce qui confirme que l'augmentation de la finesse compense partiellement l'effet de dilution du clinker.

IV.2.5.2. Résistance à la compression

Tableau IV.6. Résistances mécaniques des échantillons EP3 et EP5

Echantillons	Refus (%)	Comp 2j (MPa)	Comp 7j (MPa)	Comp 28j (MPa)
E3	15	20,55	37,85	49,15
E5	5	25,2	41,7	54,45
Ep3	15	16,83	31,5	43,5
Ep5	5	22,15	36,75	49

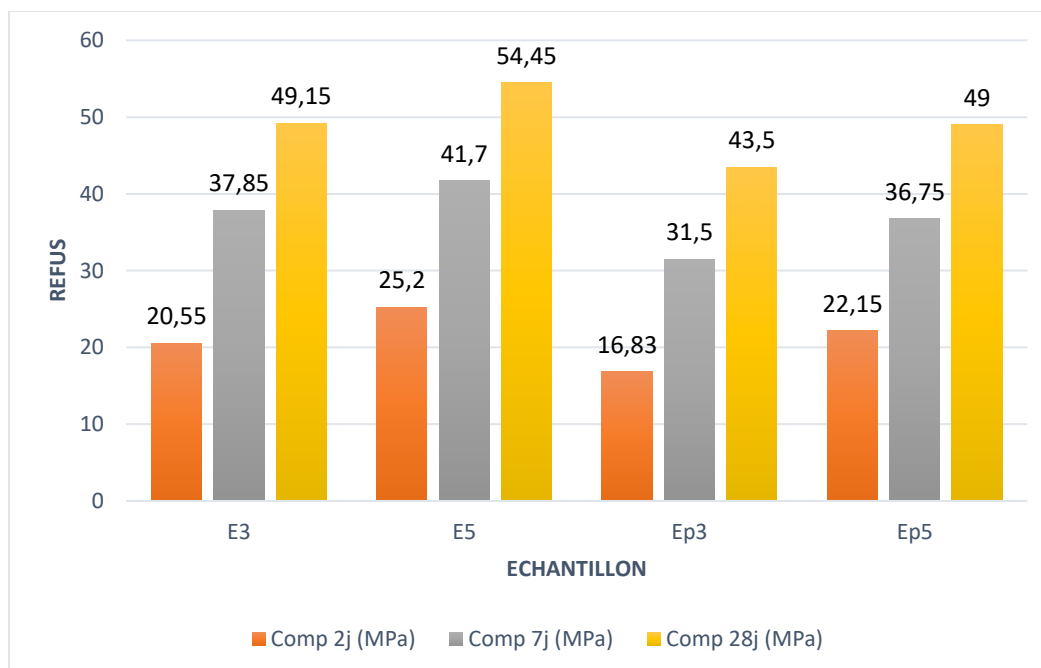


Figure IV.6. Comparaison des résistances à la Compression des échantillons E3,EP3 et E5,EP5

- À jeune âge, les résistances des échantillons avec 20 % d'ajout sont inférieures aux échantillons sans initiaux. Cela s'explique par la réaction pouzzolanique plus lente. Néanmoins, l'échantillon EP5 montre une meilleure résistance grâce à sa finesse élevée qui favorise l'hydratation initiale.
- À 7 jours, les résistances augmentent nettement pour tous les échantillons. Les ciments avec ajout commencent à développer leurs performances grâce au démarrage de la réaction pouzzolanique. L'échantillon EP5 reste supérieur à EP3, montrant l'effet positif de la finesse.
- À 28 jours, les résistances deviennent élevées et conformes aux exigences mécaniques. L'échantillon EP5 atteint la meilleure valeur, ce qui montre que la combinaison entre une **finesse élevée et l'ajout de pouzzolane** permet d'obtenir un ciment performant tout en réduisant la teneur en clinker.

On observe que l'échantillon Ep5 (20 % d'ajout, 5 % de refus) atteint une résistance de 49 MPa. Cette valeur est quasiment équivalente à celle de l'échantillon E3 (8 % d'ajout, 15 % de refus).

Valorisation de la réserve de résistance : Les résultats montrent que même avec un taux d'ajout élevé, la finesse extrême (5 %) maintient le ciment à un niveau de performance largement suffisant pour les exigences de la classe étudiée.

IV.2.6 Conclusion

Les résultats expérimentaux démontrent que l'augmentation du taux de la pouzzolane est compatible avec le maintien de performance aux exigences normatives. Malgré l'augmentation de

la teneur en pouzzolane les résistances obtenues à 28 jours varient de 43MPa à 49MPa selon la finesse du ciment. Ces résultats confirment la pertinence de cette approche pour l'optimisation de la formulation des ciments composés.

Remarque

À noter que la réserve de résistance observée pour le ciment atteignant 49MPa présente une réserve de résistance. Cette marge de performance ouvre la possibilité d'augmentation d'avantage le taux de la pouzzolane au-delà de 20% et, par conséquent, d'envisager le développement d'un ciment de type CEM II/B-P (21–35) .

IV.3 Estimation de l'impact économique et environnemental de l'optimisation du taux d'ajout.

Sur la base des résultats obtenus, l'augmentation de la finesse du ciment permet d'envisager une augmentation du taux d'ajout dans la formulation tout en maintenant des performances mécaniques conformes aux exigences normatives. Cette optimisation permettrait de réduire significativement la consommation du clinker, ce qui présente à la fois un intérêt économique et un avantage environnemental, notamment par la diminution des émissions de CO₂ lié à la production du clinker.

Les émissions de CO₂ liées à la production de deux sources : la décarbonatation du calcaire lors de la formation du clinker et la combustion du combustible nécessaire pour atteindre les températures élevées du four de cuisson.

Dans le cas de cimenterie étudiée (SCIBS), dont la production annuelle est d'environ 700 000 tonnes de ciment, une estimation de l'impact potentiel de cette optimisation peut être réalisée. Le tableau suivant présente une comparaison entre la situation actuelle et une situation optimisée basée sur une augmentation du taux d'ajout.

1. Décomposition du calcaire (décarbonatation)

C'est la **source principale de CO₂** (réaction chimique).



2. Combustion du combustible (énergie du four)

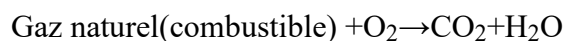


Tableau IV.7. Comparaison entre la situation actuelle et une situation optimisée basée sur une augmentation du taux d'ajout

Paramètre	Situation actuelle	Situation Optimisé
Production annuelle du ciment (85% Clinker+5% Gypse + 10% ajout Pouzzolane)	700 000 t	700 000 t
Taux de clinker dans le ciment	85%	75% (20% Pouzzolane +5% Gypse)
Quantité du clinker utilisée	595 000 t	525 000 t
Economie du clinker	-	70 000t/an
Emission de CO₂ associées au clinker^(*)	357 000 t	315 000 t
Réduction estimée des émissions de CO₂	-	42 000 t/an

(*) Estimation basée sur un facteur d'émission moyen d'environ 0.60 tonnes de CO₂ par tonne de clinker, en considérant l'utilisation du gaz naturel comme combustible dans le procédé de cuisson.

$\text{CO}_2(t) = \text{production du clinker (t)} \times \text{facteur d'émission (t CO}_2\text{/t clinker)}$

IV.3.1 Conclusion

La substitution partielle du clinker par la pouzzolane permet de réduire la consommation de clinker et par conséquent les émissions de CO associées. L'estimation basée sur le clinker économisé montre une diminution significative de l'empreinte carbone (environ 40.000 t/an de CO₂), confirmant l'intérêt environnemental de cette approche.



Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus de cette étude confirment que la finesse du ciment, exprimée par le refus au tamis de $45\mu\text{m}$, constitue un paramètre déterminant influençant les propriétés physiques et mécaniques du ciment.

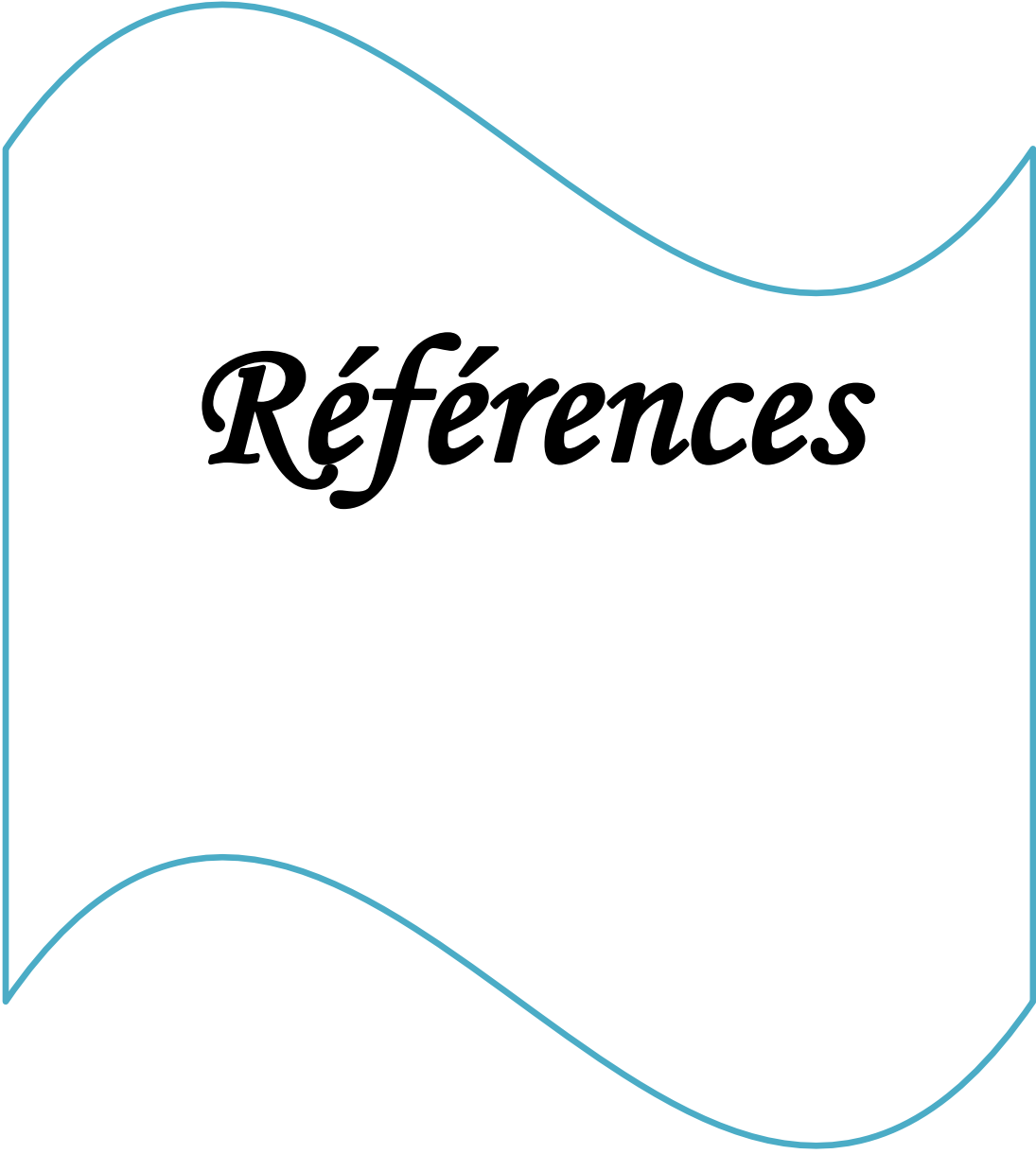
L'optimisation de la finesse par broyage progressif a permis d'améliorer les performances du ciment la réduction de refus à $45\mu\text{m}$ de 25% à 5% a permis d'augmenter la résistance à la compression d'environ 8 MPa) Ce gain significatif démontre que l'amélioration de la finesse constitue un levier efficace pour renforcer les performances mécaniques du ciment et compenser les effets liés à l'augmentation du taux de substitution du clinker par pouzzolane.

Compte tenu du gain de résistance obtenu grâce à l'optimisation de la finesse, les résultats expérimentaux montrent qu'il est possible d'envisager une augmentation du taux de la pouzzolane tout en maintenant les performances conformes aux exigences normatives. Cette approche ouvre de nouvelles voies pour l'optimisation de la formulation des ciments composés.

Au-delà des aspects techniques, l'accroissement du taux de substitution du clinker présente un double avantage. D'une part, il permet de réduire la consommation du clinker et d'améliorer la compétitivité économique du produit. D'autre part contribue à la diminution des émissions de CO_2 et la réduction de l'empreinte carbone du ciment. Dans le cas de la cimenterie étudiée, le gain environnemental est estimé à environ 420 00 tonnes de CO_2 évitées par an. Cette réduction significative des émissions s'inscrit dans la stratégie actuelle de décarbonations de l'industrie cimentière et répond aux objectifs de développement d'une production plus durable et plus respectueuse du climat.

Toutefois, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude doivent être considérés à la lumière des conditions expérimentales retenues. L'application de ces conclusions à l'échelle industrielle nécessite des investigations complémentaires tenant compte des contraintes réelles d'exploitation. Des études approfondies permettront ainsi de mieux évaluer les limites techniques, économiques et environnementales de l'augmentation du taux de substitution du clinker par la pouzzolane dans un contexte industriel.

Au terme de cette étude, cette expérience nous a permis de nous immerger dans le milieu industriel et de confronter les connaissances théoriques acquises au cours de notre cursus universitaire aux réalités du terrain. Elle nous a également offert l'opportunité d'acquérir de nouvelles compétences techniques, de mieux cerner les contraintes du secteur cimentier et d'enrichir notre expérience pratique.



Références

Références :

- [1] MOUMENE SARA ATHAMNIA GHANIA Thème : CIMENT ET CIMENTERIES EN ALGERIE : PRODUCTION ET NORMALISATION Mémoire de Mastère Université de Guelma
- [2] YETTOU AHMED MAMMERI OUSSAMA Effet des addition minérales sur la durabilité des bétons Mémoire de Master Spécialité : Matatériaux Université Saad DAHLEB Blida
- [3] SELLAOUI CHARAF EDDINE Thème : Etude comparative des propriétés rhéologiques des pâtes de ciments Mémoire de master Université 8 Mai 1945 de Guelma 2023
- [4] Sidi yakoub Abdelwahab Dahmani Miloud influence de pourcentage de clinker incuit sur la qualité de ciment (cpj) Mémoir de master Centre universitaire Belhadj Bouchaib 2017 /2018
- [5] Bye, G.C. (1999). Portland Cement: Composition, Production and Properties. 2nd edition. Thomas Telford, London.
- [6] GICA (2020). Rapport annuel du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie. Alger, Algérie.
- [7] SALHI KAMEL - Thème - Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton Mémoire de magister UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA 2007
- [8] ARIDJ ABDERRAHMANE Impact de la minéralogie de clinker sur la broyabilité et les performances des broyeurs ciment MÉMOIRE DE MASTER Université Mohamed Khider de Biskra 2020
- [9] MEBARKI Henen Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications MEMOIRE DU MASTER UNIVERSITE TLEMCEN 2013
- [10] DEBOUB Omar ZERAQULIA Yasser Présentation des différentes cimenteries en Algérie et étude d'un silo en béton armé Mémoire Master II Option Materiaux Université SAAD DAHLEB Blida-1-
- [11] Duda, W.H. (1985). Cement Data Book. 3rd edition. Bauverlag, Wiesbaden .
- [12] Hrache Sana Caractérisation physico-chimique du ciment de la cimenterie d'ech chlef diplôme de Licence professionnelle en Génie de la formulation Université akli mohand oulhadj bouira 2019 /2020
- [13] Djebbari Oussama Charaf Eddine Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker MÉMOIRE DE MASTER Université Mohamed Khider de Biskra 2020
- [14] Edem Kodjo EKLOU ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET DE DURABILITÉ DES CIMENTS BINAIRES ET TERNAIRES À BASE DE METAKAOLIN ET DE POUSSIÈRE GRANITIQUE Mémoire de Master Institut International d'Ingénierie 2019/2020

REFERENCES

- [15] MEZERAÏ NAIMA Durabilité d'un mortier à base d'un ciment portland composé à la Pouzzolane CPJ-CEM II A vis-à-vis d'un milieu agressif MEMOIRE DU MASTER ACADEMIQUE EN CHIMIE MEMOIRE DU MASTER ACADEMIQUE EN CHIMIE 2013
- [16] ZADMI Hanane ADJIRI Kaouther L'impact de calcaire sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques dans la classe A du ciment MASTER EN GENIE DES PROCEDES UNIVERSITÉ de BLIDA 1 2022/2023
- [17] ZERROUK Najoua Détermination quantitative des constituants du ciment de quatre composants MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Master génie des procédés et des matériaux 2011-2012
- [18] Smaïne Mohamed Rida Tahar Abdenmour Effet de la température sur les caractéristiques mécaniques d'un ciment de poudre de verre Mémoire de Master Université Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent 2021/2022
- [19] ELAHACENE MERIEM Effets des ajouts à base de calcaire sur les propriétés mécaniques du ciment - cimenterie d'Oued Sly – Chlef MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE Universty Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem 2024
- [20] Mr. GHOMARI Fouad SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID 2005 – 2006
- [21] ZIOUECHE Asma L'impact de noyau d'olive sur le ciment Mémoire MASTER UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2022/2023
- [22] GHERMAOUI Amina Effets de certains métaux sur les propriétés physico des mortiers de ciment de Béni -saf sans ou avec ajout de pouzzolane. UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM MASTER EN CHIMIE 2015
- [23] SAYOUD ACHRAF Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre Mémoire de master Université 8 mai 1945 de Guelma juillet 2021
- [24] Chorfi Ouassila Benmihoub Wafaa Sara L'impact du laitier de haut fourneau sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment MASTER ACADEMIQUE EN GENIE DES PROCEDES UNIVERSITÉ de BLIDA 1 2023
- [25] Benaïssa Aya Malek et Merzougui Asma Caractérisation du minerai de fer comme composé du clinker pour la fabrication du ciment MASTER En Génie Mécanique Mohamed Boudiaf University of M'sila 2021/2022.
- [26] Mr. BENAÏSSA Abouseyf Mr. HASSINOUI Youssef Optimisation du Taux Des Incuits Dans le Ciment CEM II/A 42,5 Mémoire Master CENTRE UNIVERSITAIRE BELHADJ BOUCHAÏB D'AÏN-TEMOUCHENT 2018

REFERENCES

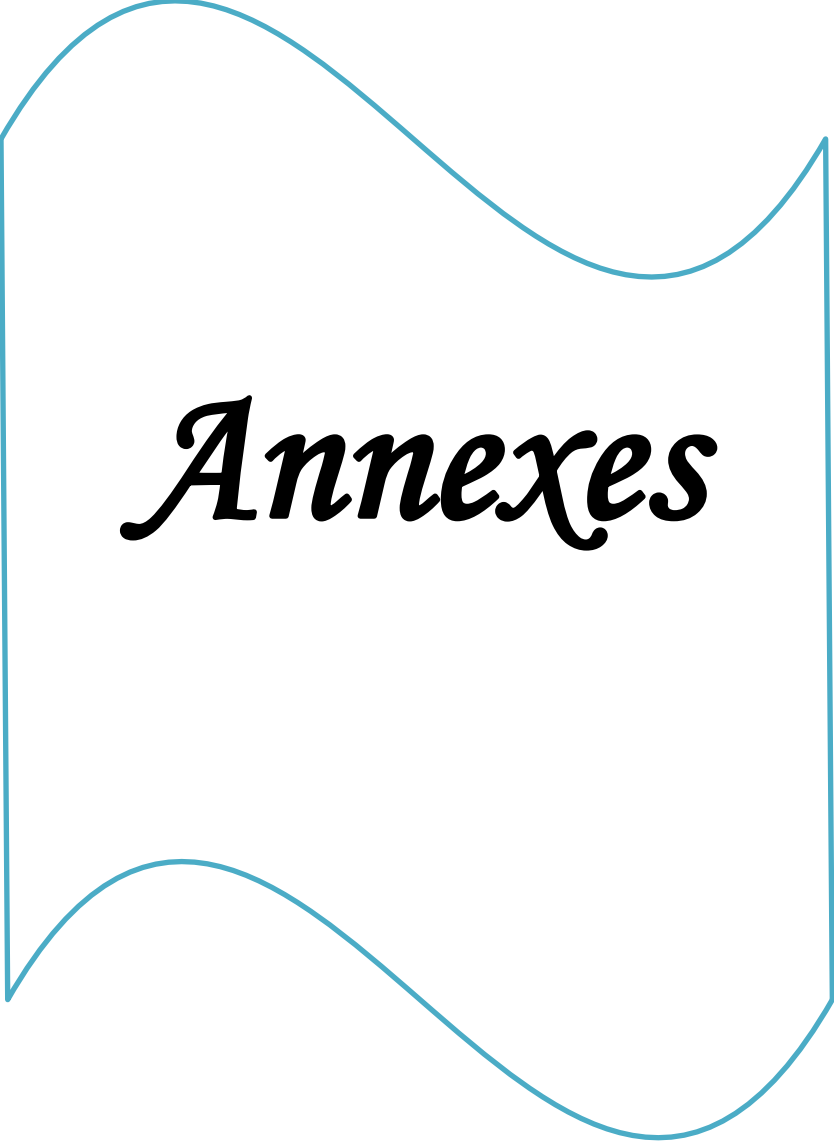
- [27] MERZOUGUI ISHAK Improve clinker reactivity - impact on cement performance MÉMOIRE DE MASTER Génie chimique Université Mohamed Khider de Biskra 2019–2020
- [28] Hamel Chourouk & Bouheka Abdia ÉTUDE DES MORTIERS à BASE D'UNE POUZZOLANE NATURELLE LOCALE Mémoire de Master Spécialité Génie civil UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET 2022
- [29] HADJI Ben Salah Etudes des propriétés physico-mécaniques et durabilité d'un béton de sable à haute performance : expérimentation et statistique Doctorat en sciences Université Mohamed Khider – Biskra 2022
- [30] HABIRECH NADA Influence des adjuvants à base des déchets végétaux sur le comportement du béton armé – Etat de l'art Mémoire de fin d'études Université Université de 8 Mai 1945 Guelma 2025 .
- [31] François JACQUEMOT ACCÉLÉRATION DU DURCISSEMENT DES LIANTS À BASE DE LAITIER DE HAUT FOURNEAU POUR LES PRODUITS PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON
- [32] IDIR Melinda ZADRI Hanane Activation du Laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons Master en Génie civil Option : Structures Université Abderrahmane MIRA- Bejaia 2021-2022
- [33] Harbi Radhia Propriétés physico-mécaniques et durabilité des Mortiers avec additions minérales Thèse de Doctorat Matériaux et Structures Université 8 Mai 1945 Guelma 2018
- [34] REDADAA FAYZA MAHAMDI SAMIRA Caractérisation physiques et de durabilité Des ciments composés à base de brique Mémoire de master Université 08 mai 1945 de Guelma 2018 .
- [35] TEBINA NARIMENE IMPACT FINESSE DE CIMENT SUR LE TEMPS DE PRISE ET LE DURCISSEMENT DU MORTIER MÉMOIRE DE MASTER Université Mohamed Khider de Biskra 2021-2022.
- [36] Nisrine El Fami Activations chimique et mécanique de ciments composés: Clinker Portland-Filler calcaire-Cendres volantes THESE DOCTORAT Université Mohammed V de Rabat 2022
- [37] NOUI Ammar Contribution à l'étude des caractéristiques physiques et mécaniques et de la durabilité des ciments ternaires Diplôme de Doctorat en Sciences UNIVERSITÉ DE M'SILA FACULTÉ DE TECHNOLOGIE 2018
- [38] MABROUK Amira Valorisation des sous-produits locaux dans l'industrie du ciment Portland Mémoire de master 2ème année Option : Conception et Calcul des Structures Université Mohamed Khaider Biskra

REFERENCES

- [39] SEDDIKI Abdelwahhab Étude comparative entre un ciment à composition Classique et un ciment au laitier Master académique Filière : Génie minier Université Larbi Tebessi – Tébessa 2021-2022
- [40] SAYAD Youcef Comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de Biskra) Doctorat en sciences Spécialité Modélisation des matériaux et structures Université Mohamed Khider – Biskra
- [41] DAGUIANI Salah Eddine Contribution à l'étude des ciments spéciaux destinés aux ouvrages en zones sahariennes diplôme de Doctorat LMD spécialité : Géo-matériaux en génie civil UNIVERSITE KASDI MERBAH -OUARGLA 2024
- [42] Benkradidja Manel et Ben yassed Soumia Analyse du broyage d'un ciment portland compose MASTER EN GENIE DES PROCEDES Option : science et génie des Matériaux UNIVERSITE DE BLIDA 1 2020 .
- [43] Elodie Romilliat Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker Spécialité : Génie des Procédés obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne 2006
- [44] BOURROUBEY CHAHRAZED INFLUENCE DE LA PERLITE NATURELLE SUR LES RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN MASTER Filière : Génie Civil Spécialité : Structure Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem 2018 / 2019
- [45] Rabet Amina Battach Fouzia Effet de la finesse sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment à base d'ajout calcaire MEMOIRE DE MASTER Matériaux de Génie Civil UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB-BLIDA1
- [46] **EN 196-6 (2018)**. Méthodes d'essai des ciments – Partie 6 : Détermination de la finesse.
- [47] **NA 443**. Méthodes d'essais des ciments, **Institut Algérien de Normalisation**, Algérie
- [48] **NA 442**. Ciments - Composition, spécifications et critères de conformité., Institut Algérien de Normalisation (IANOR), Algérie.
- [49] **EN 196-2 (2013)**. Méthodes d'essai des ciments – Partie 2 : Analyse chimique du ciment., **CEN**, Bruxelles.
- [50] **EN 196-21 (2013)**. Méthodes d'essai des ciments – Partie 21 : Dosage de la chaux libre (CaO libre)., **CEN**, Bruxelles.
- [51] **ISO 29581-2 (2010)**. Ciments - Méthodes d'essai- Partie 2 : Analyse chimique par fluorescence X (XRF)

REFERENCES

- [52] **NA 229**. Méthodes d'essais des ciments, Institut Algérien de Normalisation (IANOR), Algérie.
- [53] **EN 196-3 (2016)**. Méthodes d'essai des ciments – Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.
- [54] **EN 196-1 (2016)**. Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : Détermination de la résistance
- [55] **NA 428**. Préparation du mortier normalisé pour essais des ciments, IANOR, Algérie
- [56] JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE Mercredi 26 Rajab 1437 Correspondant au 4 mai 2016 .



Annexes

ANNEX01

Groupe Industriel des Ciments d'Algérie
Société des Ciments de Béni Saf "S.C.I.B.S"

Spa au capital social : 1.800.000.000 DA ش.ذ.ا. - رأسمالها الاجتماعي
 RC N° 098B0842033-46/00 I.F N° 099846084203346 N° Article d'imposition : 46232600011

FICHE TECHNIQUE CIMENT

CEM II/A-P 42.5 N

Janvier 2026

Conformément à la Norme Algérienne NA 442/2013

Essais physico Mécaniques	Valeurs Mesurées	Norme Algérienne NA 442/2013	Composition chimique (%)	Valeurs Mesurées	Norme Algérienne NA 442/2013
SS Blaine (cm ² /g)	3546	-	SiO ₂	27.50	-
Consistance normalisée (%)	26.83	-	Al ₂ O ₃	5.29	-
Début de prise (mn)	113	≥ 60	Fe ₂ O ₃	3.36	-
Compression 02 jours (N/mm ²)	21.91	≥ 10.0	CaO	58.07	-
Compression 07 jours (N/mm ²)	39.08	-	MgO	1.00	-
Compression 28 jours (N/mm ²)	49.76	≥ 42.5	SO ₃	1.70	≤ 3.5
Flexion 02 jours (N/mm ²)	4.18	-	Chlorures	0.032	≤ 0.1
Flexion 07 jours (N/mm ²)	6.02	-	Residus Insolubles	5.12	-
Flexion 28 jours (N/mm ²)	7.15	-	Perte au feu	1.94	-
Expansion à chaud sur pâte (mm)	0.5	≤ 10	CaO libre	1.07	-

DOMAINE D'UTILISATION DU CIMENT

CEM II/A-P 42.5 N :

Ce ciment est plus couramment utilisé dans :

- Travaux nécessitant une résistance initiale élevée (Décoffrage rapide).
- Béton en élévation, armé ou d'ouvrage courant.
- Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.
- Dallages, sols industriels.
- Maçonneries
- Stabilisation des sols

DISPOSITION PARTICULIERE :

Mode de Stockage du ciment

Le ciment est conservé dans des silos en béton étanches à des températures comprises entre 40 et 50 °C quand le ciment est frais.

Mode de livraison :

- En sacs de 50 kg par camions et wagons scellés
- En vrac par camions citernes (cocottes) et wagons citernes scellés

Emballage :

Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis munis d'une valve permettant le remplissage du ciment par injection. Le système de fermeture garantit l'inviolabilité du sac

RECOMMANDATIONS POUR L'EMPLOI :

- Il est recommandé de stocker le ciment dans des endroits étanches secs.
- Lors des travaux en saisons chaudes, arroser régulièrement le béton.
- Utiliser des agrégats propres (sable, gravier)
- Respecter le dosage ciment – eau – agrégats.
- Utiliser un vibreur ou (toute autre machine) lors des coulées de grande masse.

Figure A.1. Fiche technique de cimenterie Béni saf

ANNEX02

Tableau A.2. Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques
[56]

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa				Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours		min	Mm
32,5 L ^{a)}	—	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	
32,5 N	—	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	—				
42,5 L ^{a)}	—	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	—				
42,5 R	≥ 20,0	—				
52,5 L ^{a)}	≥ 10,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	—				
52,5 R	≥ 30,0	—				
a) Classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III.						

ANNEX03

Tableau A.3. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques et Les 27 produits de la famille des ciments courant [56]

1	2	3	4	5
Propriété	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences ^{a)}
Perte au feu	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	≤ 5,0 %
Résidu insoluble	EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM III	toutes classes	≤ 5,0 %
Teneur en sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I CEM II ^{c)} CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
		CEM III ^{d)}	toutes classes	
Teneur en chlorure	EN 196-2	tous types ^{e)}	toutes classes	≤ 0,10 % ^{f)}
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	toutes classes	satisfait à l'essai

- a) Les exigences sont données en pourcentage en masse du ciment produit fini.
- b) Détermination des résidus insolubles dans l'acide chlorhydrique et le carbonate de sodium.
- c) Les ciments de type CEM II/B-T et CEM II/B-M avec T > 20% peuvent contenir jusqu'à 4,5 % de sulfate (SO₃) quelle que soit la classe de résistance.
- d) Le ciment de type CEM III/C peut contenir jusqu'à 4,5 % de sulfate.
- e) Le ciment de type CEM III peut contenir plus de 0,10 % de chlorure mais, dans ce cas, la teneur maximale en chlorure doit figurer sur l'emballage et/ou le bon de livraison.
- f) Pour des applications en précontrainte, les ciments peuvent être produits selon une exigence plus basse. Dans ce cas, la valeur de 0,10 % doit être remplacée par cette valeur plus basse qui doit être mentionnée sur le bon de livraison.

ANNEXES

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse ^{a)})											
			Constituants principaux										Constituants secondaires	
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceux e	Calcique e					
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
	CEM II/B-P		65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/A-Q		80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-Q		65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
	Ciment Portland composé ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	<----- 12-20----->										0-5
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35----->										0-5
	CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM III/B			20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM III/C			5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	<----- 11-35 ----- >					—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	<----- 36-55 ----- >					—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	<----- 18-30 ----- >			—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	—	<----- 31-49 ----- >			—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées au tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

c) Dans les cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir des exemples à l'Article 8).