



Université Mohamed Khider –Biskra
Faculté d'architecture, d'Urbanisme,
de Génie Civil et hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux en génie civil

L'effet des ajouts laitier et pouzzolane sur les propriétés de ciment à court et à moyen terme

Présenté et soutenu par :

Aicha Hazreche

Encadré Par :

Ben Aichi EL hadj

Soutenu le : mercredi 4 juin 2025

Devant le Jury composé de :

Houara Salma

Président

Masmoudi Mounira

Examineur

Année universitaire : 2024 /2025





Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Monsieur BEN AICHI EL HADJ, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité constante tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son expertise et son encadrement rigoureux ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours universitaire. Grâce à leur dévouement, leur patience et leur transmission généreuse du savoir, j'ai pu acquérir les bases solides nécessaires à ma formation et à mon épanouissement académique. Merci à chacun d'entre vous pour vos efforts, vos conseils éclairés et votre passion pour l'enseignement. Vous avez su éveiller en moi le goût de l'apprentissage et le sens de la rigueur scientifique.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble de l'équipe du Laboratoire de Génie Civil, pour leur accueil chaleureux, leur assistance technique, ainsi que les moyens matériels mis à ma disposition, qui ont été d'une grande aide dans la réalisation des essais expérimentaux. À tous, je témoigne ma reconnaissance sincère.





الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم اما بعد

ان هذا العمل هو مجهود سنين طوال من الجد والتعب وما كنا لنصل لما نحن عليه الان لولا توفيق من الله عزوجل وذلك فضل الله يؤتيه من يشاء

بالمقام الاول لا يسعنا الا ذكر الوالدين الكريمين الذين تابعا هذا الكفاح خطوة خطوة ووثقت جهودهم كل ما بلغناه ف عرفانا

ابي العزيز الحمد لله الذي جعلك من بين صفوة الرجال ابا لي واسال الله ان يرزقك طول العمر وصحة البصيرة و البصر وان يرزقني الجهد الثابت لآكون سببا في ان تصل لما تخلصت عنه في سبيل ان تصل عائشة.....الوالد الكريم السيد احمد هزرش.

يكفيني شرفا اني تتلمذت تحت يديها فصقلت ضميري و انارت سبيلي وانهالت دعوتها علي في كل خطوة خطيتها يوما,عينها الساهرة ما ملت يوما في ان توقض عزيمتي وشموخي اسال الله ان يرزقني طيلة العمر والصحة الدائمة وان يهبني فرصة اسعادك يوما... الوالدة الكريمة السيدة جنان . ي ..

خديجة سمية ايمان اسلام ومحمد ملاذي في الدنيا وسري وملجني الذي الود بالفرار اليه من نوائب الزمان , اسال الله ان يثبتكم ويرزقكم من حيث لا تحتسبوا

كان دائما ما ينتظر يوم تخرجي وكم تمنيت ان اعيش هذه اللحظة بحضوره وتكمل المسرة لكن لله ما اعطى و لله ما اخذ, رحمك الله واسكنك فسيح جنانه وجمعنا بك في جنان الرحمان.

جدي الغالي المجاهد السيد لعروسي هزرش

وجدان واميرة صديقتين اختين سندي الدائم في مخبر التجارب صعب المراس ,رفيقتين من خيرة ما يتشرف المرء بالتعرف عليهشكرا

وفي الاخير الحمد لله الذي بلغنا هذا المبتغى فالحمد له دائما وابدأ.



Résumé :

Cette étude vise à évaluer l'effet de l'ajout de matériaux pouzzolaniques sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment. Quatre types de substitutions partielles ont été examinés : la première formulation contient 15 % de laitier de haut fourneau ; la deuxième, 10 % de laitier et 5 % de pouzzolane naturelle ; la troisième, 5 % de laitier et 10 % de pouzzolane ; tandis que la quatrième est composée de 15 % de pouzzolane naturelle. Les essais ont été réalisés sur des mortiers cimentaires normalisés, et les performances ont été évaluées à 7, 14, 28 et 40 jours afin d'analyser l'évolution de la résistance mécanique ainsi que d'autres propriétés. Les résultats obtenus montrent que les ajouts étudiés influencent de manière significative le comportement du ciment, notamment en termes de résistance à la compression à court et moyen terme, avec des effets variables selon la nature et le pourcentage de l'ajout.

Mots-clés: Ciment résistant aux sulfates, laitier de haut fourneau, pouzzolane naturelle, substitution partielle, résistance mécanique, durabilité.

Abstract:

This study aims to evaluate the effect of pozzolanic material additions on the physical and mechanical properties of cement. Four types of partial replacements were investigated: the first mix contains 15% ground granulated blast furnace slag; the second mix includes 10% slag and 5% natural pozzolan; the third mix comprises 5% slag and 10% pozzolan; while the fourth mix contains 15% natural pozzolan. The tests were conducted on standardized cement mortars, and the specimens were evaluated at 7, 14, 28, and 40 days to analyze the development of mechanical strength and other properties. The results showed that the studied additions significantly affect cement performance, particularly in terms of compressive strength in the short and medium term, with varying impacts depending on the type and proportion of the added material.

Keywords: Sulfate-resistant cement, ground granulated blast furnace slag, natural pozzolan, partial substitution, mechanical strength, durability.

الملخص:

يهدف هذا البحث الى دراسة تأثير اضافة المواد البوزولانية على الخصائص افيزيائية و الميكانيكية للاسمنت , تمت دراسة اربعة انواع من الاحلال الجزئي حيث الخلطة الاولى تحتوي على 15 من خبث الافران العالية , الخلطة الثانية تحتوي على 10 من خبث الافران العالية و 5 من ابوزولان الطبيعي , الخلطة الثالثة تحتوي على 5 خبث الافران العالية و 10 بوزولان طبيعي اما الخلطة الرابعة فتحتوي على 15 من البوزولان الطبيعي. اجريت التجارب على مونة اسمنتية معيارية , وتم تقييمها بعد 7,14,28,40 يوما لتحليل تطور المقاومة الميكانيكية وخصائص اخرى , اظهرت النتائج ان الاضافات المدروسة تؤثر بشكل واضح على اداء الاسمنت , خصوصًا من حيث مقاومة الضغط على المدى القصير والمتوسط, مع اختلاف في التأثير حسب نوع ونسبة المادة المضافة.

الكلمات المفتاحية: إسمنت مقاوم للكبريتات، خبث الأفران العالية، البوزولان الطبيعي، إحلال جزئي، مقاومة ميكانيكية، ديمومة

Sommaire:

Remerciment	
الإهداء	
Résumé	
Abstract	
الملخص	
Sommaire	
Tableau de matière	Page
Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse Bibliographique	
I.1) Introduction	3
I.2) Aperçu générale sur le ciment	3
I.2.1) Définition du ciment et ses composants principaux	3
I.2.2) Processus de fabrication du ciment	3
I.2.3) Classification des différents types de ciment	7
I.2.4) Classification des ciments en fonction de leurs résistances normales	8
I.2.5) Le Ciment Résistant aux Sulfates (CRS)	9
I.2.5.1) Définition du ciment résistant aux sulfates (CRS)	9
I.2.5.2) Caractéristiques physico-chimiques du CRS	9
I.2.5.3) Classification selon la norme NF EN 197-1:2011	9
I.2.5.4) Domaines d'application	10
I.2.5.5) Avantages du ciment CRS	10
I.2.5.6) Inconvénients et Limitations et précautions d'utilisation	11
I.3) Les ajouts	11
I.3.1) Définition des ajouts	11
I.3.2) Classification des additions utilisées dans la fabrication du ciment	11
I.3.3) Rôle de l'ajout cimentaire	12
I.3.4) Les propriétés des ajouts	13
I.3.5) Comportement du ciment avec ajout	13
I.3.6) Effets des additions minérales sur les matériaux cimentaires	14
I.3.7) les ajouts dans le ciment	14
I.3.7.1) Le laitier de haut fourneau comme addition pour le ciment	14
I.3.7.1.1) Définition et origine du laitier de haut fourneau	14
I.3.7.1.2) Différents types de laitier	15

I.3.7.1.2.1) Laitier granulé (vitrifié)	15
I.3.7.1.2.2) Laitier bouleté	15
I.3.7.1.2.3) Laitier cristallisé	16
I.3.7.1.3) Caractérisation de laitier de haut fourneau	16
I.3.7.1.3.1) caractéristiques chimiques	16
I.3.7.1.3.2) Caractéristiques géotechniques	17
I.3.7.1.3.3) Caractéristiques environnementales	18
I.3.7.1.4) Revu des études antérieures sur l'utilisation du laitier dans l'amélioration du ciment	18
I.3.7.1.4.1) Influence du laitier de haut fourneau sur la résistance mécanique du ciment	19
I.3.7.1.4.2) Impact du laitier sur la durabilité et la porosité	19
I.3.7.1.4.3) Influence de la finesse du laitier sur son activité hydraulique	19
I.3.7.1.4.4) Effets sur les produits d'hydratation et l'alcalinité	19
I.3.7.1.4.5) Réduction de la chaleur d'hydratation	20
I.3.7.2) La pouzzolane comme addition pour le ciment	20
I.3.7.2.1) L'origine des pouzzolanes naturelle	20
I.3.7.2.2) Définition des pouzzolanes	20
I.3.7.2.3) Les deux types de pouzzolanes	21
I.3.7.2.3.1) La pouzzolanes naturelle	21
I.3.7.2.3.2) La pouzzolane artificielle	21
I.3.7.4) Comportement de La pouzzolane	22
I.3.7.4.1) A l'état frais	22
I.3.7.4.2) A l'état durci	22
I.4.7.5) Etude précédentes sur le rôle de la pouzzolane dans l'amélioration des performances du ciment	23
I.4.7.5.1) Influence de la pouzzolane sur les propriétés mécaniques du béton	23
I.4.7.5.2) Amélioration de la durabilité du béton	23
I.4.7.5.3) Contribution environnementale et réduction des émissions de CO₂	23
I.4.7.5.4) Comparaison avec d'autres ajouts cimentaires	23
I.5) Revu bibliographique sur les mortiers	24
I.5.1) Définition du mortier	24
I.5.2) Types de mortiers Mortier de ciment selon leur composition et leurs performances mécaniques	24
I.5.2.1) Le mortier de ciment	24
I.5.2.2) Le mortier de chaux	25
I.5.2.3) Le mortier bâtard	25
I.5.2.4) Le mortier de plâtre	26
I.5.3) Normes et classifications des mortiers	26

I.5.4) Constitution des mortiers	27
I.5.4.1) Le ciment	27
I.5.4.2) La chaux	27
I.5.4.3) Les sables	28
I.5.4.4) L'eau	28
I.5.5) Étude des qualités d'un mortier	28
I.6) Conclusion	29
Chapitre II: les caractéristiques des matériaux utilisés	
II.1) Introduction	30
II.2) Le ciment	30
II.2.1) caractéristiques du ciment utilisé	30
II.2.1.1) Les caractéristiques physiques	30
II.2.1.2) Les caractéristiques chimiques et minéralogiques	30
II.2.1.2.1) Composition chimique	31
II.2.1.2.2) Composition minéralogique	31
II.3) Les ajouts minéraux	31
II.3.1) Pouzzolane (Pz)	32
II.3.2) Laitier de haut fourneau (L)	32
II.3.3) les caractéristiques des ajouts :	32
II.3.3.1) Les caractéristiques physiques des ajouts	32
II.3.3.2) Les caractéristiques chimiques des ajouts	33
II.4) L'eau de gâchage	33
II.5) Le sable	33
II.5.1) Analyse géométrique	34
II.5.1.1) Analyse granulométrique [EN 933-1]	34
II.5.1.2) Le module de finesse du Sable (Mf) selon la norme (NA EN 12620)	34
II.5.2) Les caractéristiques physiques et mécaniques :	34
II.5.2.1) La masse volumique (NF P 18-554 et NF P18-555 et NA 255)	37
II.5.2.1.1) La masse volumique apparente $\rho(g/cm^3)$	37
II.5.2.1.2) La masse volumique absolue $\rho(g/cm^3)$	37
II.5.2.1.3) Porosités, Compacité et L'indice des vides	39
II.5.2.1.3.1) La porosité	41
II.5.2.1.3.2) La compacité	41
II.5.2.1.3.3) L'indice des vides	41
II.5.3) Les caractéristiques physico-chimiques :	41
II.5.3.1) L'équivalent de sable [NFP 18-597, EN 933-8]	42
II.6) Les caractéristiques des compositions de ciment :	42
II.6.1) Les pourcentages des ajouts dans chaque composition :	45
II.6.2) La masse volumique apparente	45
II.6.3) La masse volumique absolue	46

II.6.4) Essai de Consistance de la pâte de ciment EN 196-3	47
II.6.5) Essai de prise de la pâte de ciment EN 196-3	48
II.7) Confection de mortier	51
II.7.1) Méthodologie des essais	57
II.7.2.1) Essais sur mortier (selon la norme NF EN 196-1)	57
II.7.2.1.1) A l'état frais	59
II.7.2.1.1.1) Essai d'étalement selon la norme NF P 18-450 et P15-437(La maniabilité)	59
II.7.2.1.2) A l'état durci :	59
II.7.2.1.2.1) Essai non destructif	61
II.7.2.1.2.1.1) Essai de la vitesse des impulsions ultrasonores (UPV) – Vitesse de propagation du son selon la norme (NF EN 12504-4):	61
II.7.2.1.2.1.2) Essai d'absorption totale d'eau selon la norme NF P (18-459)	61
II.7.2.1.2.2) Essais destructif	62
II.7.2.2.3.1) Résistance à la flexion	64
II.7.2.2.3.2) Résistance à la compression	64
II.8) Conclusion	65
Chapitre III : Analyse et Interprétation des résultats	
III1) Introduction	66
III2) Interprétation et analyse des résultats des caractéristiques des compositions de ciment	67
III2.1) La masse volumique apparente et absolue	67
III2.3) La consistance normale	68
III2.4) Début de prise, Fin de prise	69
III3) Interprétation et analyse des résultats de mortier	71
III3.1) A l'état frais	71
III3.1.1) La maniabilité	71
III3.2) A l'état durci	72
III3.2.1) Essai non destructif	72
III3.2.1.1) La Pert masse volumique des éprouvettes	72
III3.2.1.2) La variation de l'absorption totale des éprouvettes	73
III3.2.1.3) La vitesse de sens des éprouvettes	75
III3.2.2) Essai destructif	77
III3.2.2.1) La résistance à la Compression	82
III3.2.2.2) La résistance à la Flexion	79
III4) Analyse des formulations idéales en fonction de la résistance à la Compression et à la Flexion	81
III5) Conclusion	83
Conclusion générale	84
Références	

Tableaux des matières :

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Principales categories de ciment selon leurs compositions	7
Tableau I.2: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe	8
Tableau I.3: Classification des ajouts selon leur reactivite (Norme SIA 215)	11
Tableau I.4: Les caractéristiques chimiques de laitier de haut fourneau	
Tableau I.5: Les caractéristiques géométriques de laitier de haut fourneau	18
Tableau I.6: Correspondances EN et NF relatives aux mortiers	26
Tableau II.1: Propriétés physiques de ciment (CRS)	31
Tableau II.2: Temps de prise de ciment (CRS)	31
Tableau II.3: Propriétés chimiques de ciment (CRS)	31
Tableau II.4: Composition minéralogiques de ciment	32
Tableau II.5: caractéristiques physiques des ajouts minéraux	32
Tableau II.6: Module de basicité (Mb) et d'activité (Ma) du Laitier	33
Tableau II.7: Composition des ajouts minéraux	34
Tableau II.8: les résultats d'analyse granulométrique	36
Tableau II.9: Masse volumique apparente de sable utilisé	39
Tableau II.10: Masse volumique absolue de sable	40
Tableau II.11: Porosité , compacité et l'indice des vides de sable	42
Tableau II.12: Les résultats d'équivalent de sable	44
Tableau III.13: Les pourcentages des ajouts dans chaque composition	45
Tableau IV.14: la masse volumique apparente des compositions	46
Tableau II.15: Les masses nécessaires pour calculer la masse volumique absolue de ciment	48
Tableau II.16: La masse volumique absolue des compositions	48
Tableau II.17: La composition de pâte de prise	50
Tableau II.18: Résultats d'essai de consistance normale	54
Tableau II.19: Début de prise de C1	54
Tableau II.20: Fin de prise de C1	54
Tableau II.21: Début de prise de	55
Tableau II.22: Fin de prise de C1	55
Tableau II.22: Début de prise de	55
Tableau II.23: Fin de prise de C1	56
Tableau II.24: Début de prise de	56
Tableau II.25: Fin de prise de C1	57

Tableau II.27: Composition des mélange de mortier pour des dosages déferents des ajouts minéraux	59
Tableau II.20: Les résultats obtenues se l'essai de maniabilité	61
Tableau III. 1: La masse volumique apparente et absolue des compositions de ciment.	72
Tableau III.2: Détermination de la consistance normale des compositions de ciment.	74
Tableau III. 3: Le début et la fin de prise des compositions de ciment.	74
Tableau III. 4: La variation d'étalement des déferentes compositions.	76
Tableau III. 5: Pert de masse volumique des éprouvettes.	77
Tableau III. 6: l'absorption totale des éprouvettes.	78
Tableau III. 7: La vitesse de sens des éprouvettes.	79
Tableau III.8: La variation de la résistance à la compression des éprouvettes réservées sous l'eau.	82
Tableau III. 9: La variation de la résistance à la flexion des éprouvettes réservées sous l'eau.	83

Liste des figures :

Figure I.1: Les étapes de fabrication de ciment	5
Figure I.2: La fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).	5
Figure I.3: La fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).	6
Figure I.4: La fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).	6
Figure I.5: La fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).	6
Figure I.6: Une Fondations en sols gypseux.	10
Figure I.7: Salins Stations de traitement des eaux Ouvrages hydrauliques et maritimes.	10
Figure I.8: La Pouzzolane	21
Figure I.9: mortier de ciment.	24
Figure I.10: Le mortier de chaux.	25
Figure I.11: Le mortier bâtard.	25
Figure I.12: Le mortier de plâtre.	26
Figure II.1: La courbe granulométrique de sable.	38
Figure III.1: La masse volumique apparente et absolue des déférentes compositions.	67
Figure III.2: La consistance normale des compositions de ciment.	69
Figure III.3: Début et Fin de prise des différentes compositions de ciment.	70
Figure III.4: La variation de maniabilité des différentes.	71
Figure III.5: La perte de masse volumique des éprouvettes.	73
Figure III.6: L'absorption totale des éprouvettes.	74
Figure III.7: La vitesse de sens des éprouvettes.	75
Figure III.8 : La variation de Résistance à la compression	77
Figure III.9 : La variation de la résistance à la flexion des éprouvettes	79

Liste des photos :

Photo II.1: Laitier de haut fourneau.	33
Photo II.2: Pouzzolane naturelle.	33
Photo II.3: Analyse granulométrique de sable.	34
Photo II.4: La masse volumique apparente de sable.	38
Photo II.5: La masse volumique apparente de sable	40
Photo II.6: Essai d'équivalent de sable.	44
Photo II.7: Différentes compositions du ciment utilisé.	45
Photo II.8: La masse volumique apparente de ciment.	46
Photo II.9: Les étapes d'essai de la masse volumique absolue.	47
Photo II.10: Consistance normale de ciment.	48
Photo II.11: La prise de ciment.	53
Photo II.12: Malaxeur et les moule de mortier et l'appareille à chocs.	57
Photo II.13: Mortier après le malaxage.	58
Photo II.14: L'étalement de mortier.	60
Photo II.15: Vitesse de sens.	62
Photo II.16: La conservation 3jours dans l'étuve à 105°C.	63
Photo II.17: Essais de résistance à la flexion.	64
Photo II.18: Essais de résistance à la compression.	65

Introduction Générale

Introduction Générale :

L'industrie du ciment est aujourd'hui confrontée à de nombreux défis, notamment en matière de durabilité, de performance et de réduction de l'empreinte environnementale. La production du clinker, composant principal du ciment, est responsable d'émissions significatives de CO_2 , ce qui pousse chercheurs et professionnels du bâtiment à rechercher des alternatives plus durables. Parmi ces alternatives, l'utilisation d'ajouts minéraux à caractère pouzzolanique, tels que le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle, se présente comme une solution prometteuse.

Problématique

Dans un contexte où la performance des matériaux de construction doit aller de pair avec la durabilité environnementale, il est essentiel de comprendre comment les ajouts minéraux influencent les propriétés du ciment. Le ciment résistant aux sulfates (CRS), utilisé dans des environnements agressifs, pourrait bénéficier de l'incorporation de matériaux réactifs secondairement, tels que le laitier et la pouzzolane. Toutefois, l'impact combiné ou individuel de ces ajouts sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment à court et moyen terme reste à approfondir.

Comment ces ajouts influencent-ils les propriétés du ciment CRS au fil du temps ?

Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de l'incorporation du laitier de haut fourneau et de la pouzzolane naturelle, seuls ou en combinaison, sur les performances d'un ciment résistant aux sulfates (CRS). Cette évaluation porte plus précisément sur :

L'influence de ces ajouts sur la consistance des pâtes de ciment ;

La variation de la masse volumique apparente des mélanges ;

L'évolution de la résistance à la compression aux âges de 7, 14, 28 et 40 jours.

Démarche méthodologique

Pour atteindre ces objectifs, une approche expérimentale a été adoptée.

Elle se base sur :

Une revue bibliographique traitant des ajouts minéraux et de leur comportement dans les liants hydrauliques ;

Introduction Générale

Une caractérisation physico-chimique des matériaux utilisés (ciment CRS, laitier, pouzzolane, sable, eau) ;

La formulation de quatre mélanges : un mélange de référence (sans ajouts), et trois mélanges contenant différents taux de laitier et de pouzzolane ;

Une campagne expérimentale comportant des essais normés : consistance (flow table), masse volumique apparente et résistance à la compression à différents âges de cure.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les ciments, les ajouts minéraux (laitier, pouzzolane) et les recherches antérieures ;

Le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés, leurs propriétés, ainsi que les formulations mises en œuvre ;

Le troisième chapitre détaille la méthodologie expérimentale, les procédures d'essais et les normes appliquées ;

Le quatrième chapitre expose les résultats obtenus, leur interprétation, ainsi qu'une discussion comparative avec les données de la littérature.

Ce travail vise à apporter une contribution à la compréhension de l'effet des ajouts minéraux sur les performances du ciment CRS, et à orienter vers des formulations plus durables et efficaces.

CHAPITRE I:

Synthèse

Bibliographique

I.1) Introduction :

Dans le cadre de l'étude des matériaux cimentaires et de l'amélioration de leurs performances, la compréhension approfondie des constituants et de leur interaction devient primordiale. Ce premier chapitre se consacre à une synthèse bibliographique structurée permettant de situer notre sujet de recherche dans son contexte scientifique et technique.

Il s'agira d'abord de présenter les caractéristiques générales du ciment, notamment le ciment résistant aux sulfates (CRS 42,5), en mettant en évidence sa composition chimique, ses propriétés minéralogiques, ainsi que ses performances mécaniques et durables. Ensuite, l'étude portera sur les additions minérales, et plus particulièrement sur deux matériaux utilisés dans ce travail : la pouzzolane naturelle et le laitier de haut fourneau granulé. Ces additions sont reconnues pour leur potentiel pouzzolanique et leur impact favorable sur les propriétés du ciment et des matériaux à base cimentaire.

Ce chapitre analysera également les principales études scientifiques et travaux de recherche nationaux et internationaux menés sur l'effet de ces ajouts sur les propriétés physico-chimiques, mécaniques et microstructurales des liants hydrauliques. Cette revue permettra de poser les bases théoriques indispensables à la compréhension et à l'interprétation des résultats expérimentaux qui seront développés dans les chapitres suivants.

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physicomécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CPJ-CEMII/ A ou B), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. Dans cette étude, on a utilisé deux sortes d'ajouts ; des ajouts actifs comme le laitier de haut fourneau, la pouzzolane, et la fumée de silice ; des ajouts inertes comme le calcaire, et le sable de dune. [1]

I.2) Aperçu générale sur le ciment :**I.2.1) Définition du ciment et ses composants principaux :**

Le ciment Portland est un matériau adhésif composé principalement de chaux et de composés alliés de magnésium (Soroka, 1979). Ses composants principaux sont le calcaire (carbonate de calcium) et l'argile (silicates d'aluminium et de fer), qui, après réaction thermique, forment les oxydes nécessaires à son hydratation (de Castro, 2021). Le silicate tricalcique est le composant principal du ciment Portland (Nachbaur, 1997). Lors de l'hydratation, des hydrosilicates de calcium (C-S-H) se forment, assurant la cohésion de la pâte de ciment (Chen, 2007). Les ions aluminates, issus de l'hydratation des phases aluminates, peuvent se substituer aux silicates dans les C-S-H, formant des alumino-silicates de calcium hydratés (C-S-A-H) (Chen, 2007). Cette substitution influence la composition, la structure et les propriétés cohésives des particules de C-S-H. Le taux de substitution Al/Si dans une pâte de ciment est d'environ 0,04 (Chen, 2007). [2]

I.2.2) Processus de fabrication du ciment :

La fabrication du ciment est un processus complexe qui commence par l'extraction puis le broyage de matières premières, notamment du calcaire et de l'argile, en une poudre fine, appelée farine crue, qui est ensuite chauffée à une température de frittage pouvant atteindre 1450 °C dans un four à ciment. Dans ce processus, les liaisons chimiques des matières premières sont rompues, puis elles sont recombinaées en de nouveaux composés. Le résultat est appelé clinker, qui est constitué de nœuds arrondis mesurant entre 1 mm et 25 mm de diamètre. Le clinker est broyé en une poudre fine dans un broyeur à ciment et mélangé avec du gypse pour créer du ciment. Le ciment en poudre est ensuite mélangé avec de l'eau et des agrégats pour former du béton utilisé dans la construction.

La qualité du clinker dépend de la composition de la matière première, qui doit être étroitement surveillée pour garantir la qualité du ciment. Un excès de chaux libre, par exemple, entraîne des effets indésirables tels qu'une expansion du volume, un temps de prise accru ou une résistance réduite. Plusieurs systèmes de laboratoire et en ligne peuvent être utilisés pour assurer le contrôle du processus à chaque étape du processus de fabrication du ciment, y compris la formation du clinker. [2]

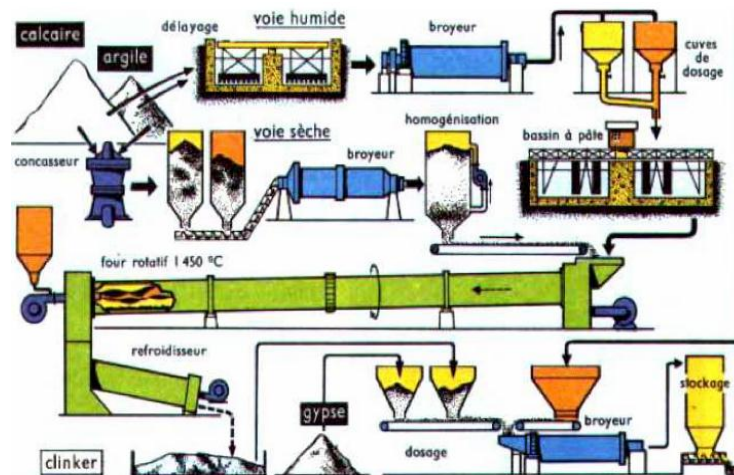


Figure I.1: Les étapes de fabrication de ciment. [3]

Donc ; la fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru ;
- cuisson ;
- broyage et conditionnement.

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

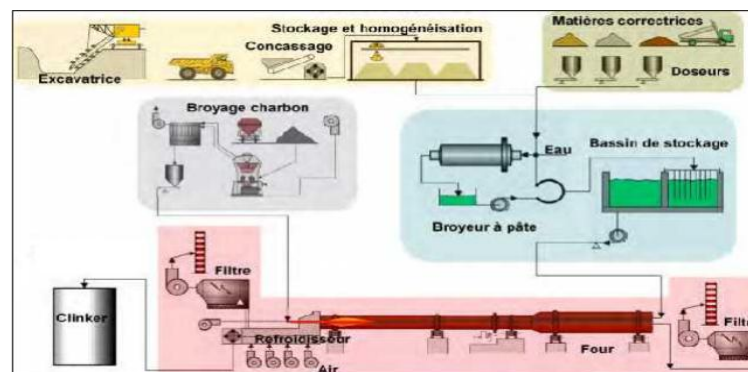


Figure I.2: La fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne). [4]

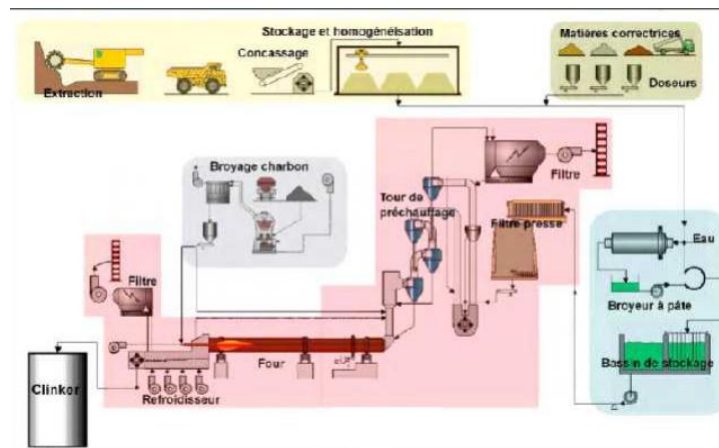


Figure I.3: La fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide). [4]

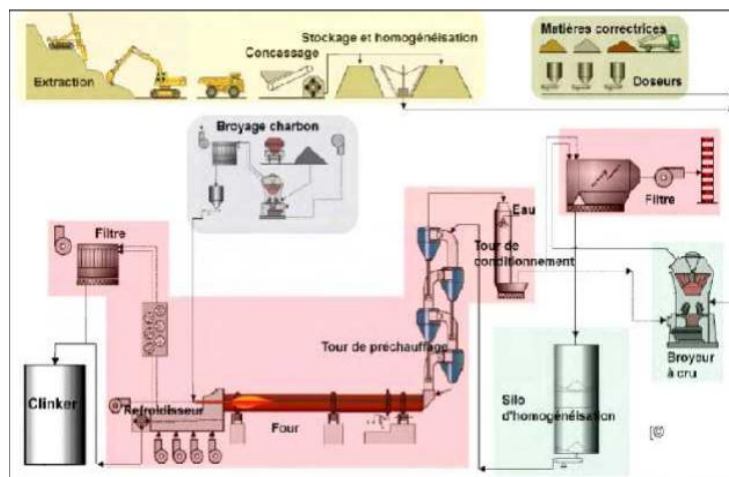


Figure I.4: La fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée). [4]

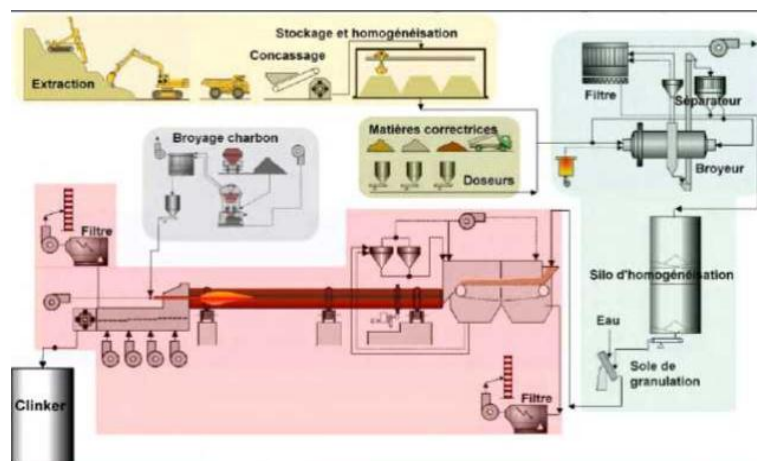


Figure I.5: La fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche). [4]

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent. [1]

Tableau I.1: Principales catégories de ciment selon leurs compositions. [5]

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier -pouzzolanes - cendres - calcaires -schistes - fumées de silice	Teneur en Constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5 %
CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	Ciment Portland composé	80 à 94 % 65 à 79 %	De 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à10 % ; de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 % 0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64%	36 à 65 % de laitier de haut fourneau. 66 à 80 % de laitier de haut fourneau.	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	81 à 95 % de laitier de haut fourneau.	0 à 5 %
CLK-CEM III/C		5 à 19 %		

CPZ- CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	36 à 55 % comme ci-dessus.	0 à 5 %
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC- CEM V/B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus.	0 à 5 %

I.2.4) Classification des ciments en fonction de leurs résistances normales :

Les ciments courants sont classés aussi en fonction de leur résistance mécanique à la compression exprimé en (MPa) à 28 jours : **32.5, 32.5 R, 42.5, 42.5 R, 52.5 et 52.5 R**. Elles doivent être respecté les spécifications et valeurs garanties des tableaux 1.2 et 1.3

Les classes << **R** >> , rapides, présentent au jeune âge des caractéristiques mécaniques plus élevées

Tableau I.2: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe. [6]

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	Au jeune âge		A 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2jours	7jours	mini	maxi	($\mu m / m$)	(min)	(min)
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5R	/13,5	/	/32,5	$\leq 52,5$	≤ 1000	/90	≤ 10

	(12)	$\leq$	(30)				
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	≤ 1000	/60	≤ 10
42,5R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	≤ 1000	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10

I.2.5) Le Ciment Résistant aux Sulfates (CRS) :

I.2.5.1) Définition du ciment résistant aux sulfates (CRS) :

Le ciment résistant aux sulfates (CRS) est une variété de ciment Portland spécialement formulée pour offrir une résistance accrue aux environnements agressifs contenant des sulfates, notamment les sols et les eaux riches en ions sulfates. Cette résistance est obtenue grâce à une faible teneur en aluminates tricalciques ($C_3 A$), ce qui limite la formation de produits expansifs comme l'ettringite, principal responsable des dégradations prématurées dans les ouvrages en béton. [7]

I.2.5.2) Caractéristiques physico-chimiques du CRS :

Faible teneur en $C_3 A$ (< 3,5 %) : limite les réactions avec les sulfates. Teneur élevée en silicates ($C_2 S$ et $C_3 S$) : assure le développement de résistances à long terme. Faible chaleur d'hydratation : adapté aux bétons massifs. Temps de prise prolongé : favorable en zones chaudes. [8]

I.2.5.3) Classification selon la norme NF EN 197-1:2011 :

Selon cette norme, les ciments résistants aux sulfates sont déclinés en plusieurs types : CEM I-SR 0, SR 3, SR 5 : ciments Portland classiques avec différents niveaux de résistance aux sulfates. CEM III/B-SR : ciments au laitier, naturellement résistants

aux sulfates. CEM IV/A-SR, IV/B-SR : ciments pouzzolaniques adaptés à certaines expositions. [9]

I.2.5.4) Domaines d'application : [10]

Le CRS est recommandé pour les constructions soumises à des environnements agressifs :



Figure I.6: Une Fondations en sols gypseux. [11]

Ou



Figure I.7: Salins Stations de traitement des eaux Ouvrages hydrauliques et maritimes. [12]

Ou les Ouvrages exposés aux déversements chimiques.

I.2.5.5) Avantages du ciment CRS :

- Durabilité accrue dans les milieux agressifs.
- Réduction des risques de fissuration.
- Faible évolution thermique.
- Résistance à long terme assurée. [13]

I.2.5.6) Inconvénients et Limitations et précautions d'utilisation :

- Coût plus élevé que le ciment Portland ordinaire.
- Prise plus lente à court terme.
- Nécessité d'une cure adaptée pour préserver les performances. [14]

I.3) Les ajouts :**I.3.1) Définition des ajouts :**

Les ajouts sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton. Ils sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou divers plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton. [15]

I.3.2) Classification des additions utilisées dans la fabrication du ciment :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [16].

Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (I.7) ci-dessous.

Tableau I.3: Classification des ajouts selon leur réactivité [Norme SIA 215, 1978].

Type	Réactivité	matériaux
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en

		calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomée
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

I.3.3) Rôle de l'ajout cimentaire :

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau

- **Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire :**

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C3S et C2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le bétonné qui augmente la perméabilité de lessivage.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique. Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



I.3.4) Les propriétés des ajouts :

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes:

- Des **propriétés hydrauliques** : par réaction avec l'eau, ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau,
- **Des propriétés pouzzolaniques** : ils peuvent former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables (combinaison à T° ordinaire de la chaux avec de l'eau : formation lente des constituants analogues à ceux du clinker et composés hydratés),
- **Des propriétés physiques** :

Améliorant certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité . . .).

Le terme ciment désigne plusieurs catégories de produits, chacune étant définie par sa composition et des classes caractérisant les résistances mécaniques atteintes à des échéances données après le début d'hydratation.

Selon la norme française NF P 15-301, les ciments sont regroupés en cinq types principaux : le ciment Portland (type I), le ciment Portland composé (type II), le ciment de haut fourneau (type III), le ciment pouzzolanique (type IV) et le ciment au laitier et aux cendres (type V). [18]

I.3.5) Comportement du ciment avec ajout :

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout.

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme et améliore la résistance du béton en milieu agressif.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons. [19]

I.3.6) Effets des additions minérales sur les matériaux cimentaires:

L'incorporation des additions minérales dans les liants hydrauliques modifie de manière significative leurs propriétés, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Ces effets sont principalement liés à la finesse des additions et à leur réactivité variable en milieu cimentaire.

I.3.7) les ajouts dans le ciment :

Les recherches sur l'utilisation de matériaux pouzzolaniques comme additifs cimentaires ont suscité un intérêt croissant en raison de leur potentiel de réduction des coûts et d'amélioration des propriétés du béton. Il a été démontré que les pouzzolanes naturelles de Béni-Saf et les pouzzolanes artificielles issues de boues calcinées améliorent les propriétés mécaniques et la résistance chimique des mortiers par rapport au ciment ordinaire. [20]

I.3.7.1) Le laitier de haut fourneau comme addition pour le ciment :**I.3.7.1.1) Définition et origine du laitier de haut fourneau :**

Les laitiers de hauts-fourneaux sont des coproduits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques, ils sont formés de la gangue du minerai de fer, des fondants ajoutés, des impuretés du coke. Ce sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium. La structure minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement. Plus rapide est le refroidissement (la trempe), plus vitreux est le laitier. Le laitier refroidi est en forme de granulés. Le laitier granulé est utilisé en cimenterie, soit dans le cru en remplacement de l'argile (en particulier dans le procédé par voie sèche), soit au moment du broyage avec le clinker, le gypse comme ajout minéral.

Ainsi donc le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été broyé séparément ou après avoir été broyé avec le clinker. Il peut aussi être vendu séparément aux producteurs de béton qui l'introduise dans le béton comme ajout cimentaire.[21]

I.3.7.1.2) Différents types de laitier: [22]

I.3.7.1.2.1) Laitier granulé (vitrifié) :

- **Principe et objectifs de la granulation du laitier À l'origine :**

La granulation du laitier de haut fourneau était principalement destinée à faciliter sa manutention en fragmentant le laitier liquide par trempe dans un bassin d'eau. Cette méthode rudimentaire a progressivement révélé un avantage important : le laitier ainsi granulé présente **des propriétés hydrauliques latentes**, qui le rendent apte à être utilisé comme addition minérale dans la fabrication de ciments.

Le procédé de granulation repose sur un principe fondamental : **extraire rapidement la chaleur du laitier fondu**, de manière à atteindre des températures inférieures à 800°C dans un délai très court. Cette trempe rapide permet la formation d'une **structure vitreuse amorphe**, indispensable pour garantir la réactivité du laitier dans un milieu cimentaire.

Au fil du temps, plusieurs procédés de granulation ont été développés et perfectionnés dans le but de :

- **Stabiliser les caractéristiques physiques et chimiques** du laitier granulé, afin d'assurer une qualité constante ;
- **Améliorer sa réactivité hydraulique**, et donc son efficacité en tant qu'addition cimentaire ;
- **Réduire la consommation d'eau**, qui reste significative dans le procédé traditionnel (entre 8 et 10 m³ par tonne de laitier fondu).

I.3.7.1.2.2) Laitier bouleté:

La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air. Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses.

I.3.7.1.2.3) Laitier cristallisé:

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé. Après solidification de la surface, le refroidissement est activé par un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier.

I.3.7.1.3) Caractérisation de laitier de haut fourneau : [23]

Les granulats produits à partir des laitiers cristallisés HF sont caractérisés par les normes :

NF EN 13242 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

NF EN 13043 : Granulats pour mélanges bitumineux et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aéroports et d'autres zones de circulation.

XP P 18 545 articles 7, 8, 9 et 10 : Granulats – Eléments de définition, conformité et codification.

P 18-302 : Laitier cristallisé de haut-fourneau

NF EN 13139 : Granulats pour mortiers

NF EN 12620 : Granulats pour bétons hydrauliques.

I.3.7.1.3.1) caractéristiques chimiques :

Les laitiers HF contiennent essentiellement quatre éléments dont l'expression conventionnelle en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres constituants sont des oxydes secondaires tels que FeO et MnO ainsi que des composés sulfurés. Ils ne contiennent ni argile et matière organique.

Tableau I.4: les caractéristiques chimiques de laitier de haut fourneau.

Elément	Matière sèche(%)
Chaux (CaO)	38 à 48
Silice (SiO ₂)	29 à 41
Alumine (Al ₂ O ₃)	9 à 18
Magnésie (MgO)	1 à 9
Manganèse (MnO)	0.4 à 0.7
Fer (FeO)	0.2 à 4
TiO ₂	0.4 à 0.9
Na ₂ O	0.2 à 0.5
K ₂ O	0.3 à 0.9
Soufre (S)	0.6 à 1.5

I.3.7.1.3.2) Caractéristiques géotechniques :

Le laitier de haut-fourneau de fraîche production est nommé hématite du fait de l'utilisation de minerais de fer importés de type hématite.

Les propriétés des granulats sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau I.5: Les caractéristiques géotechniques de laitier de haut fourneau.

Essai	Norme	Pont-à-Mousson Fraîche production	Dillingen fraîche production
Caractéristiques intrinsèques			
PSV	NF EN 1097-8	NA	50 à 52
LA	NF EN 1097-2 19	19 à 30	34 à 49
MDE	NF EN 1097-1	9 à 13	21 à 33
MVR	NF EN 1097-6	2.55 à 2.73	2.4 à 2.7
Caractéristiques de production			
Granularité	NF EN 933-1	0/31.5	0/31.5
Forme des gravillons	NF EN 933-3	-	2 à 7
Gel	NF EN 1367-1	< 1	< 2
MB	NF EN 933-9	< 2	< 2
Désintégration du silicate bicalcique	NF EN 1744-1 Article 19.1	90 %	100%
Désintégration du fer	NF EN 1744-1 Article 19.2	100 %	100 %

I.3.7.1.3.3) Caractéristiques environnementales :

Les co-produits sidérurgiques que sont les laitiers ne font pas à ce jour l'objet de réglementation nationale en matière de protection de l'environnement.

Et ce, sans doute, parce que l'expérience que l'on a de leur valorisation en technique routière depuis des décennies n'a jamais montré d'impact négatif sur l'environnement. Actuellement, en l'absence de textes réglementaires relatifs à la caractérisation environnementale des sous-produits industriels et pour les laitiers de haut fourneau

cristallisés de Dillingen, l'innocuité environnementale est jugée en faisant référence aux seuils de la circulaire du 9 mai 1994 (DPPR/SEI/BPSIED N° 94-IV-1) relative aux Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM de catégorie V). Ces laitiers sont donc soumis à un essai de lixiviation selon la norme NF X 31-210. Les critères retenus afin de juger de cette innocuité sont les suivants : les teneurs en mercure, plomb, cadmium, arsenic, chrome VI, sulfates, et COT, ainsi que la fraction soluble et le taux d'imbrûlés.

I.3.7.1.4) Revu des études antérieures sur l'utilisation du laitier dans l'amélioration du ciment :

I.3.7.1.4.1) Influence du laitier de haut fourneau sur la résistance mécanique du ciment :

Plusieurs recherches ont démontré que l'incorporation du laitier de haut fourneau moulu dans le ciment permet une amélioration significative des résistances mécaniques à moyen et long terme. Escalante-García et Sharp (2001) pour l'objectif d'évaluer l'effet du remplacement de 50% du laitier ont montré qu'un remplacement de 50 % du clinker par du laitier augmente la résistance à la compression à 90 jours. Ce gain est attribué à la formation secondaire de C-S-H issus de la réaction pouzzolanique lente du laitier, qui densifie la microstructure et améliore la durabilité du matériau. [24]

I.3.7.1.4.2) Impact du laitier sur la durabilité et la porosité :

Selon Chen et Brouwers (2010) , le laitier de haut fourneau participe à la réduction de la porosité capillaire et à l'amélioration de la compacité du réseau cimentaire. Ces changements microstructuraux permettent une meilleure résistance à la pénétration des agents agressifs (sulfates, chlorures, etc.). L'étude souligne également que le laitier réduit la perméabilité des pâtes hydratées, ce qui favorise la durabilité à long terme des bétons. [25]

I.3.7.1.4.3) Influence de la finesse du laitier sur son activité hydraulique :

La réactivité du laitier est étroitement liée à sa finesse. Tagnit-Hamou et al. (2011) ont prouvé qu'un broyage plus poussé du laitier permet une activité hydraulique plus

élevée, notamment à court terme. Ce comportement est dû à l'augmentation de la surface spécifique réactive, ce qui favorise la dissolution des phases vitreuses et accélère la formation des hydrates de type C-S-H. [26]

I.3.7.1.4.4) Effets sur les produits d'hydratation et l'alcalinité :

Selon Taylor (1997), l'ajout de laitier modifie la nature chimique des produits d'hydratation. Le laitier forme principalement du C-S-H à faible rapport Ca/Si, contribuant à une structure plus stable et plus dense. En parallèle, il consomme une partie importante de l'hydroxyde de calcium (CH), réduisant ainsi les risques de réactions délétères, notamment les attaques sulfatées. [27]

I.3.7.1.4.5) Réduction de la chaleur d'hydratation :

L'un des avantages notables du laitier est sa capacité à réduire la chaleur d'hydratation. L'étude menée par Puertas et al. (2000) a mis en évidence que l'intégration de laitier entraîne une diminution significative de la température de pic d'hydratation, ce qui est particulièrement bénéfique pour les ouvrages massifs. Ce comportement limite le développement de fissures dues aux gradients thermiques internes. [28]

I.3.7.2) La pouzzolane comme addition pour le ciment :

I.3.7.2.1) L'origine des pouzzolanes naturelle:

La pouzzolane, un matériau volcanique provenant de la ville de Pouzzoles en Italie. Utilisée depuis l'époque romaine, elle permettait, en mélange avec la chaux et l'eau, d'obtenir un mortier très durable. Les pouzzolanes résultent des projections volcaniques et contiennent les mêmes éléments de base que les laitiers, mais en proportions différentes : moins de 10 % de chaux, entre 20 et 45 % de silice, 12 à 15 % d'alumine, et jusqu'à 10 % de magnésie et d'oxyde de fer. Selon la norme ASTM C618-94, la somme des oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) doit dépasser 70 %. [29]

I.3.7.2.2) Définition des pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes.[30]



Figure I.8: La pouzzolane. [31]

I.3.7.2.3) Les deux types de pouzzolanes :**I.3.7.2.3.1) La pouzzolanes naturelle :**

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinés dans un four ou transformés, puis broyés pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618). [DAHMANI.S, 2018]. [32]

I.3.7.2.3.2) La pouzzolane artificielle:

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite. [33]

I.3.7.4) Comportement de La pouzzolane :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

I.3.7.4.1) A l'état frais :

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage.

Elles réduisent la chaleur d'hydratation. Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

I.3.7.4.2) A l'état durci :

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance. [34]

I.4.7.5) Etude précédentes sur le rôle de la pouzzolane dans l'amélioration des performances du ciment :**I.4.7.5.1) Influence de la pouzzolane sur les propriétés mécaniques du béton :**

L'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les mélanges cimentaires entraîne une amélioration notable des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression, à la traction et à la flexion. Cette amélioration est généralement attribuée à la réaction pouzzolanique, qui favorise la formation de produits cimentaires secondaires (CSH) et densifie la matrice du béton, réduisant ainsi sa porosité. [35]

I.4.7.5.2) Amélioration de la durabilité du béton :

La pouzzolane naturelle améliore considérablement la durabilité du béton, notamment en milieu agressif (milieux marins, sols sulfatés). Elle réduit la perméabilité aux ions chlorures, la porosité capillaire et ralentit la pénétration des agents agressifs, augmentant ainsi la longévité des structures. [36]

I.4.7.5.3) Contribution environnementale et réduction des émissions de CO₂ :

L'utilisation de la pouzzolane naturelle comme ajout cimentaire permet de réduire considérablement les émissions de CO₂ liées à la fabrication du ciment Portland. Une étude d'analyse de cycle de vie (ACV) a montré que le remplacement de 30 % du ciment par de la pouzzolane réduit l'empreinte carbone sans compromettre les performances mécaniques. [37]

I.4.7.5.4) Comparaison avec d'autres ajouts cimentaires :

Dans une étude comparative, la pouzzolane naturelle a démontré une efficacité équivalente voire supérieure à celle des ajouts industriels tels que les cendres volantes et les laitiers de haut fourneau, en termes de résistance à long terme et de durabilité. La substitution de 20 à 30 % de ciment par des cendres volcaniques a permis d'obtenir des performances satisfaisantes. [38]

I.5) Revu bibliographique sur les mortiers :**I.5.1) Définition du mortier :**

Le mortier est un matériau composite obtenu par le mélange d'un liant hydraulique (généralement du ciment ou de la chaux), de granulats fins (sables), d'eau et, éventuellement, d'adjuvants. Il est utilisé principalement pour l'assemblage des éléments de maçonnerie (briques, blocs, pierres), le rebouchage des joints ou encore comme couche de finition (enduit). Les propriétés du mortier, telles que sa maniabilité, sa résistance mécanique ou sa durabilité, dépendent directement de sa composition, de la nature du liant et des granulats utilisés, ainsi que du rapport eau/liant. [39]

I.5.2) Types de mortiers Mortier de ciment selon leur composition et leurs performances mécaniques : [40]

Les mortiers sont des matériaux composites constitués essentiellement d'un liant (ciment, chaux, plâtre, etc.), d'un granulat fin (souvent du sable), et d'eau.

Leur formulation varie en fonction de l'usage prévu et des performances mécaniques recherchées. Selon Baudet (2003), on distingue plusieurs types de mortiers selon leur composition :

I.5.2.1) Le mortier de ciment :

Composé principalement de ciment Portland et de sable, il présente une résistance mécanique élevée, notamment en compression, ce qui le rend adapté aux ouvrages porteurs et aux milieux agressifs.



Figure I.9: mortier de ciment. [41]

I.5.2.2) Le mortier de chaux :

Constitué de chaux aérienne ou hydraulique et de sable, il est plus souple, plus perméable à la vapeur d'eau et moins rigide. Il est utilisé principalement dans la restauration du bâti ancien et dans les milieux humides.



Figure I.10: Le mortier de chaux.

I.5.2.3) Le mortier bâtard :

Mélange de ciment et de chaux, il combine les avantages des deux liants, à savoir la résistance du ciment et la souplesse de la chaux.



Figure I.11: Le mortier bâtard. [42]

I.5.2.4) Le mortier de plâtre :

Réservé aux usages intérieurs, il est moins résistant mécaniquement et peu durable à l'extérieur.



Figure I.12: Le mortier de plâtre. [43]

Les performances mécaniques des mortiers dépendent non seulement du type de liant utilisé, mais aussi du rapport eau/liant, de la granulométrie du sable, et des éventuels adjuvants incorporés. Ainsi, un rapport E/L faible augmente la résistance à la compression, tandis qu'un sable fin améliore la maniabilité au détriment de la résistance mécanique. Baudet souligne également l'importance des conditions de maturation (température, humidité) dans le développement des résistances mécaniques des mortiers, en particulier dans les premiers jours de durcissement.

I.5.3) Normes et classifications des mortiers :

Tableau I.6: Correspondances EN et NF relatives aux mortiers.

Norme EN (NF)		Domaine d'application
EN 998-1	Mortier pour enduits intérieurs/extérieures	Spécifie les exigences pour les mortiers de revêtements (enduits traditionnels)
EN 998-2	Mortier pour maçonnerie (montage)	Définit les propriétés mécaniques et physiques des mortiers de pose
EN 1015-2 à 1015-21	méthode d'essai pour mortiers à l'état frais et durci	Décrit les essais standards (consistance, résistance, perméabilité, etc.)
EN 196-1	Méthode d'essai des	Utilisée aussi pour les

	ciments : résistance mécanique	mortiers à base de ciment, notamment pour la compression
EN 413-1	Mortier à base de ciment de maçonnerie	Spécifie les exigences pour les mortiers de maçonneries préparées industriellement

I.5.4) Constitution des mortiers :[44]

I.5.4.1) Le ciment :

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différents mortiers, mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment est obtenu par un procédé continu de production en masse et, en particulier, par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation. Pour la production des ciments faisant l'objet de la présente norme, il est essentiel de disposer du personnel qualifié et spécialisé, d'installations appropriées pour effectuer les essais ainsi que pour Dans la plupart des cas, ont utilisé du ciment secondaire (CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A ou B). Pour les mortiers réalisés sur chant: on préfère les ciments a faible résistance mécanique (classe 32,5) qui donnent des mortiers moins "nerveux", au retrait moins important et présentant une déformabilité mieux adaptée.

I.5.4.2) La chaux :

Est obtenue par calcination, c'est-à-dire par chauffage à haute température, de pierres calcaires. Selon la composition du matériau de base, on distingue :

- **La chaux aérienne** : produite à partir de calcaire très pur, elle fait prise en présence de l'air.
- **La chaux hydraulique** : obtenue à partir de calcaire contenant des silicates, aluminates ou composés magnésiens, elle fait prise même en milieu humide.

I.5.4.3) Les sables :

Le sable, ou arène, est une roche sédimentaire meuble, composée de particules issues de la désagrégation d'autres roches. La dimension des grains est comprise entre 0,063 mm et 2 mm. Les sables peuvent provenir de deux sources principales :

- Naturelle : mer, oued, désert (ex. Sahara), représentant la majorité des constructions.
- Industrielle : issue du concassage de granulats de carrière, parfois recyclée à partir des déchets de construction.

I.5.4.4) L'eau :

Le dosage en eau dépend de l'utilisation prévue du mortier. Un enduit projeté nécessite une consistance plus fluide qu'un mortier destiné à l'assemblage de blocs. Un excès d'eau nuit à l'homogénéité et rend le mortier difficile à appliquer (il coule), tandis qu'un manque d'eau entraîne un mortier sec qui n'adhère pas bien (ne colle pas).

I.5.5) Étude des qualités d'un mortier : [36]

Pour les mortiers traditionnels réalisés sur chantier, les performances requises sont considérées comme satisfaisantes si les dosages sont conformes aux prescriptions du DTR Maçonnerie ou du DTU 20.1. Pour les mortiers industriels, des spécifications de fabrication précises sont exigées.

Les caractéristiques essentielles du produit utilisé sont les suivantes :

- **Maniabilité** : Elle dépend des éléments fins (liants, fillers) et des adjuvants. Une bonne maniabilité facilite la mise en œuvre.
- **Perméabilité** : Elle désigne l'aptitude du mortier à être traversé par des liquides. Elle diminue avec l'augmentation de la compacité et l'enrobage adéquat des grains internes par le liant.

I.6) Conclusion:

Ce premier chapitre a permis de construire une base théorique solide à travers une revue bibliographique approfondie des principaux constituants du ciment et des additions minérales telles que le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle.

L'analyse des sources académiques fiables incluant des thèses de doctorat, des mémoires de master et des ouvrages techniques nous a permis de mieux comprendre les propriétés physico-chimiques de ces matériaux, ainsi que leurs effets à court et moyen termes sur les caractéristiques du ciment.

Les études consultées ont mis en évidence l'intérêt croissant de l'incorporation de ces additions dans les formulations cimentaires, tant pour des raisons de performance (durabilité, résistance chimique, amélioration de la compacité) que pour des objectifs environnementaux (valorisation des déchets industriels, réduction de l'empreinte carbone). Ces résultats ont jeté les bases pour notre travail expérimental.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation détaillée des matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, en particulier le ciment résistant aux sulfates, le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle. Nous y décrirons leurs caractéristiques, les normes utilisées pour leur identification, ainsi que les méthodes d'essai permettant d'évaluer leur influence sur les performances du liant cimentaire.

CHAPITRE II:

Les caractéristiques des matériaux utilisées

II.1) Introduction :

Dans ce chapitre, les propriétés des matériaux utilisés dans la formulation des mélanges seront étudiées et caractérisées. L'objectif est de mieux comprendre comment les ajouts minéraux (le laitier de haut fourneau et la pouzzolane) influencent les propriétés mécaniques et physiques du ciment, tant à court terme qu'à long terme.

Pour réaliser cette étude, des matériaux couramment utilisés dans l'industrie de la construction ont été sélectionnés. Ces matériaux ont été caractérisés à la fois sur le plan chimique et physique, afin de s'assurer qu'ils répondent aux exigences normatives et aux critères de performance. De plus, il est crucial de comprendre leur comportement dans le processus de prise et de durcissement du ciment, qui affecte la durabilité et la résistance du béton à long terme. Les caractéristiques des matériaux, telles que la masse volumique, la finesse, l'humidité et la composition chimique, jouent un rôle essentiel dans la performance du ciment. Ces propriétés permettent de prédire la réactivité chimique et la capacité d'hydratation des ajouts minéraux, qui sont des éléments clés dans l'étude de la durabilité du ciment. Ainsi, chaque matériau a été soumis à des tests rigoureux pour évaluer son comportement sous diverses conditions d'utilisation.

II.2) Le ciment :

II.2.1) caractéristiques du ciment utilisé :

Le ciment utilisé est le **CRS-CEM III/A 42.5 N –ES**

II.2.1.1) Les caractéristiques physiques :

Tableau II.1: Propriétés physiques de ciment (CRS).

Consistance normale	25 à 28 %
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g) (NA231)	3200 à 3800 cm^2
Retrait à 28 jours ($\mu\text{m}/\text{m}$)	< 1000
Expansion (mm)	≤ 2.0
Chaleur d'hydratation	< 270j/g

Tableau II.2: Temps de prise de ciment (CRS).

Temps de prise à 20°C (NA 230)	
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

II.2.1.2) Les caractéristiques chimiques et minéralogiques :

II.2.1.2.1) Composition chimique :

Tableau II.3: Propriétés chimique de ciment (CRS).

Teneur en sulfate (SO_3)(%)	1.8 à 3
Teneur en chlorure (NA5042)(%)	< 0.1
Teneur en oxyde de magnésium (MgO)(%)	1.2 à 3

Pert eu feu (%) (NA 5042)	0.5 à 3
---------------------------	---------

II.2.1.2.2) Composition minéralogique :

Tableau V .4: Composition minéralogique de ciment.

Taux d'aluminates C_3S	< 3.0 (%)
--------------------------	-----------

II.3) Les ajouts minéraux :

Deux ajouts minéraux étudiés dans ce mémoire sont : un ajout de (Pz) et un ajout de laitier de haut fourneau granulé (L) ; qui ont été broyés puis passés au tamis 90 μ m.

II.3.1) Pouzzolane (Pz):

Produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolanique, peu consolidé de couleur allant du brun noir au rouge brique qui sert à la fabrication de mortier ou de ciment durable.

Un produit pouzzolanique est un matériau, capable de réagir en présence d'eau avec de la chaux hydratée, à laquelle il s'unit grâce à un état moléculaire particulier de la silice et de l'alumine en formants des composés nouveaux, stable, difficilement solubles et inattaquables par l'eau.

II.3.2) Laitier de haut fourneau (L):

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé.



Photo II.1 : Laitier de haut fourneau.



Photo II.2: Pouzzolane naturelle.

II.3.3) les caractéristiques des ajouts :

II.3.3.1) Les caractéristiques physiques des ajouts :

Tableau II.5: Caractéristiques physiques des ajouts minéraux.

Addition	Désignation	Masse volumiques absolue, kg/m ³	Masse volumiques apparente, kg/m ³	Surface spécifique Blaine, cm ² /g
Pouzzolane	PZ	2480	920	3800
laitier	L	2733	1080	3500

II.3.3.2) Les caractéristiques chimiques des ajouts :

Tableau II.6: Module de basicité (Mb) et d'activité (Ma) du laitier.

Module	Formule	Valeur	Observation
Mb	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	1.09	Mb > 1 donc le laitier est basique
Ma	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	0.127	

CHAPITRE II: Les caractéristiques des matériaux utilisées

Deux paramètres chimiques essentiels pour caractériser le laitier :

- **Le module de basicité (Mb) :**

Défini par le rapport, est égal à 1.09, ce qui signifie que le laitier est basique (car). Cette propriété est favorable pour les réactions pouzzolaniques avec les hydrates du ciment, contribuant à l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.

- **Le module d'activité (Ma) :**

Exprimé par le rapport, est de 0.127, ce qui suggère une teneur relativement faible en alumine par rapport à la silice. Ce paramètre donne une indication sur la réactivité potentielle du laitier vis-à-vis de l'activation alcaline ou lors de la réaction pouzzolanique. Une bonne stabilité thermique et un taux faible de matière organique ou d'humidité.

Tableau II.7: Composition chimiques des ajouts minéraux.

Addition	Teneur %									
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	SO ₃	P.F.
PZ	10.10	44.85	17.20	10.50	3.40	1.60	-	4.05	1.50	4.10
L	43.01	40.80	5.2	0.53	6.4	-	3.02	0.01	0.8	4.10

Commentaire :

- ✓ **PZ (Pouzzolane naturelle) :** riche en **SiO₂ (44.85%)** et **Al₂O₃ (17.20%)**, confirmant son caractère pouzzolanique. Sa teneur modérée en **Fe₂O₃ (10.50%)** et **CaO (10.10%)** montre qu'il s'agit d'un matériau silico-alumineux actif. La pouzzolane contient également une quantité non négligeable de **Na₂O (4.05%)** et **K₂O (3.40%)**, pouvant influencer l'alcali-réactivité.
- ✓ **L (Laitier de haut fourneau) :** se caractérise par une teneur élevée en **CaO (43.01%)**, ce qui renforce son rôle dans les réactions d'hydratation latente. Il contient également une proportion importante de **SiO₂ (40.80%)**, ce qui favorise les réactions pouzzolaniques. Le laitier présente une faible teneur en **Fe₂O₃**

(0.63%) et une absence de données pour les oxydes alcalins, ce qui peut signifier qu'ils sont négligeables ou non mesurés.

Enfin, la **perte au feu (P.F.)** pour les deux ajouts est proche (**4.10 %**), ce qui reflète une bonne stabilité thermique et un taux faible de matière organique ou d'humidité.

II.4) L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est une eau potable de laboratoire de (MDC) de génie civile université de Mohamed Khider Biskra.

II.5) Le sable :

II.5.1) Analyse géométrique :

II.5.1.1) Analyse granulométrique [EN 933-1] :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon du sable selon la norme NA EN 933-5.

Objectif de l'essai :

L'objectif de cet essai est de déterminer la répartition dimensionnelle des grains constituant un sable à l'aide d'une série de tamis normalisés. Cette analyse permet de classer le sable selon sa granulométrie et d'évaluer son aptitude à être utilisé dans la formulation des mortiers ou bétons. Le granulat bien gradué assure une meilleure compacité, une bonne ouvrabilité et une diminution de la porosité du matériau final.



Photo II.3: Analyse granulométrique de sable.

Matériel utilisé :

-Série de tamis normalisés (mailles : 5 mm, 2.5 mm, 1.25 mm, 0.63 mm ; 0.315 mm ; 0.16 mm ; 0.08 mm)

-Balance électronique de précision ($\pm 0,1$ g)

-Brosse douce pour nettoyage des tamis

-Réservoirs pour recueillir les fractions tamisées

-Agitateur mécanique (ou tamisage manuel si non disponible)

Remarque importante :

L'essai d'analyse granulométrique s'effectue

Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80μ .

Préparation de l'échantillon :

-L'échantillon doit être lavé (Dans le cas de matériaux particulièrement argileux, l'échantillon est trempé préalablement au lavage, pendant plusieurs heures).

-L'échantillon doit être séché à l'étuve à une température maximale de 105°C

-La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

-Assez grande pour que la précision soit bonne, assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable.

$M \geq 0,2D$ avec : D (mm) diamètre du plus gros granulat et M en (Kg)

Procédure expérimentale :

1. Prélever un échantillon représentatif de sable sec, préalablement séché à $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.
2. Peser l'échantillon initial avec précision (M_0).
3. Placer l'échantillon dans la série de tamis disposés du plus grand au plus petit diamètre.

CHAPITRE II: Les caractéristiques des matériaux utilisées

- Effectuer le tamisage pendant 3 minutes à l'aide d'un agitateur ou manuellement jusqu'à une séparation nette des fractions.
- Peser la masse de sable retenue sur chaque tamis.
- Calculer la fraction massique retenue et la fraction cumulée passante pour chaque tamis.

Données et Calculs :

Tableau II.8: les résultats d'analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé		Tamisâtes (%)
		(g)	(%)	
5	159,21	159,21	7,96	92,04
2,5	326,39	485,6	24,28	75,72
1,25	129,31	614,91	30,74	69,26
0.630	162,45	777,36	38,86	61,14
0.315	659,1	1436,46	71,81	28,19
0,16	413,99	1850,45	92,51	7,49
0,08	121,89	1972,32	98,59	1,41
Fond	28,02	2000,34	100	0

Définitions :

Refus partiel : Masse retenue sur chaque tamis : M_i (en grammes)

Refus cumulé en Pourcentage (le pourcentage retenu) : $R_i = (M_i / M_o) \times 100$

Le tamisât : Pourcentage cumulatif passant : $P_i = 100 - \sum_{j=1}^i R_i$

Les résultats sont généralement représentés sur un graphe semi-logarithmique avec les ouvertures de tamis en abscisse (échelle logarithmique) et les pourcentages passants en ordonnée (échelle arithmétique)

Courbe granulométrique de sable 0/5 d' Liwa :

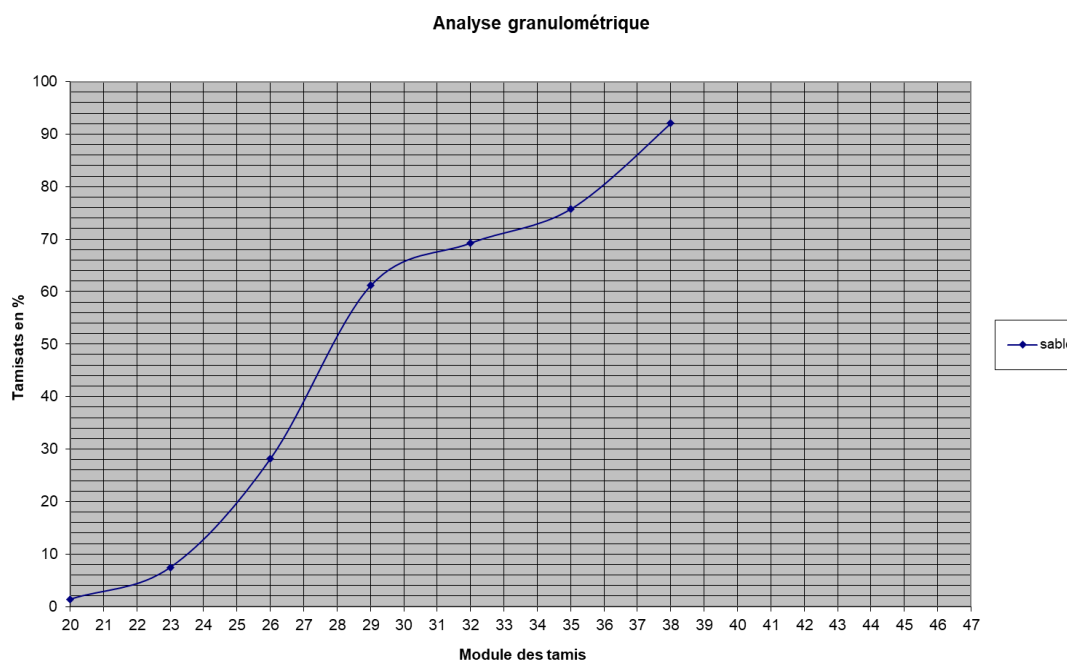


Figure II.1: La courbe granulométrique de sable.

Commentaire et observations :

✓ **Présence dominante de grains de taille moyenne :**

La majorité des fractions retenues se situent entre les tamis de 0,315 mm et 2,5 mm, ce qui indique une distribution centrée autour des dimensions moyennes. Cela témoigne d'un granulat moyennement bien gradué.

✓ **Faible teneur en fines :**

Le pourcentage passant à travers le tamis de 0,08 mm est de 7,49 %, ce qui indique une faible quantité de fines (éléments inférieurs à 80 μm). Cette caractéristique est importante pour juger du risque de ségrégation ou du comportement rhéologique du mortier ou béton.

✓ **Tamis 0,315 mm :**

Point d'inflexion notable : Le pourcentage passant chute à 28,19 %, marquant un seuil critique dans la distribution. Cela montre une accumulation significative de particules dans les fractions fines (inférieures à 0,315 mm).

✓ **Grande majorité de grains passent à travers le tamis de 5 mm :**

Le pourcentage passant est de 92,04 %, ce qui est conforme à la désignation du sable 0/5 (aucune particule ne doit dépasser 5 mm).

Conclusion technique :

Le sable analysé présente une courbe granulométrique bien étalée, une teneur faible en fines, ce qui peut être favorable pour la durabilité des bétons, une répartition granulaire compatible avec un usage courant dans les mortiers et bétons, sous réserve de vérification par le module de finesse.

II.5.1.2) Le module de finesse du Sable (Mf) selon la norme (NA EN 12620):

Le module de finesse est obtenu en sommant les pourcentages cumulés en refus (%) sur une série de tamis normalisés (5 mm – 2.5 mm – 1.25 mm – 0.63 mm – 0.315 mm – 0.16 mm), puis en divisant ce total par 100.

Calcul du module de finesse :

$$MF = \frac{7.96 + 24.28 + 30.74 + 38.86 + 71.81 + 92.51 + 98.19}{100}$$

$$MF = \frac{364.35}{100} = 3.64 \%$$

III.2.3.1.2) Le module de finesse de sable:

Le sable analysé présente **un module de finesse élevé (3.64)**, indiquant une texture **relativement grossière**. Ce type de granulométrie influence directement les propriétés de la pâte de mortier, notamment :

✓ **Ouvrabilité :**

Un sable grossier tend à **réduire la plasticité** du mortier. Par conséquent, la pâte est moins maniable et demande **plus d'eau** pour atteindre une consistance souhaitée.

✓ **Consommation de liant :**

Le besoin accru en eau pour assurer une bonne ouvrabilité peut **augmenter la demande en ciment** afin de maintenir la résistance mécanique à long terme.

✓ **Porosité du mortier :**

Une granulométrie grossière génère **une structure plus poreuse**, ce qui peut nuire à la compacité et à la durabilité du mortier si elle n'est pas correctement corrigée.

✓ **Adhérence et finition :**

Le mortier réalisé avec un sable grossier peut avoir **une finition moins lisse** et **une adhérence plus faible** aux surfaces, notamment en enduit.

II.5.2) Les caractéristiques physiques et mécaniques :**II.5.2.1) La masse volumique (NF P 18-554 et NF P18-555 et NA 255) :****II.5.2.1.1) La masse volumique apparente : $\rho(\text{g/cm}^3)$** **Objectif de l'essai :**

L'objectif de cet essai est de déterminer la masse volumique apparente du sable, c'est-à-dire la masse par unité de volume d'un matériau en vrac, y compris les vides intergranulaires. Cette propriété est utilisée pour évaluer la compacité du granulat et pour la formulation des mortiers et bétons.



Photo II.4: La masse volumique apparente de sable.

Matériel utilisé :

- Cylindre ou récipient de volume connu
- Balance électronique de précision ($\pm 0,1$ g)
- Entonnoir standardisé
- Règle ou racloir
- Étuve (si l'essai est effectué sur un sable sec)

Procédure expérimentale :

1. Sécher le sable à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante (si nécessaire).
2. Peser le récipient vide (**masse M_1**).
3. Remplir le récipient à l'aide d'un entonnoir sans compacter le sable.
4. Niveler la surface supérieure à l'aide d'une règle.
5. Peser le récipient plein (**masse M_2**).
6. Calculer la masse de sable : (**M**).
7. Calculer la masse volumique apparente : (**ρ_{app}**) .

Où (**V**) est le volume du récipient

Donnés et résultats attendus :

La masse volumique apparente est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_1 - M_2) / V$$

Tableau II.9: Masse volumique apparente de sable utilisé.

M_1 (g)	V (cm^3)	M_2 (g)	ρ (g/cm^3)
299.76	1000	1920.83	1.621

Commentaire :

La masse volumique apparente (**$1.621 g/cm^3$**) : Cette valeur traduit une densité moyenne du sable à l'état meuble, indiquant une granulométrie relativement équilibrée. Cela favorise une bonne ouvrabilité des mélanges et contribue à la stabilité

mécanique à court et moyen terme, ce qui est bénéfique dans le cadre de l'étude des effets des ajouts minéraux.

II.5.2.1.2) La masse volumique absolue $\rho(g/cm^3)$:

Objectif de l'essai :

L'essai a pour but de déterminer la masse volumique absolue (réelle) du sable, c'est-à-dire la masse par unité de volume excluant les vides entre les grains. Elle permet de mieux comprendre la nature minéralogique du sable et d'effectuer des calculs précis de formulation dans les matériaux de construction.

Matériel utilisé

- Pycnomètre (volume généralement de 250 ml ou 500 ml)
- Balance électronique de précision ($\pm 0,01$ g)
- Étuve pour le séchage des échantillons
- Bouteille d'eau distillée
- Entonnoir
- Spatule ou tige agitatrice
- Bain-marie ou système de dégazage

Procédure expérimentale

1. Sécher une quantité appropriée de sable (environ 300 g) à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante.
2. Peser environ 300 g de sable sec (masse M)
3. Introduire le sable dans le pycnomètre.
4. Remplir le pycnomètre avec de l'eau jusqu'au trait de jauge.
5. Dégazer le mélange (par agitation ou bain à ultrasons) afin d'éliminer l'air interstitiel.
6. Lire le pycnomètre rempli uniquement d'eau (volume V_1).

7. Lire le pycnomètre rempli de sable et d'eau jusqu'au même niveau (volume V_2).



Photo II.5: La masse volumique apparente de sable.

8. Calculer la masse volumique réelle selon la formule :

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Donnés et résultats attendus :

Tableau II.10: La masse volumique absolue de sable.

La masse volumique absolue de sable			
M(g)	V_1	V_2	$\rho(g/cm^3)$
300	400	522.66	2.44

Commentaire :

La masse volumique absolue (**2,44 g/cm³**) : Légèrement inférieure aux valeurs typiques des sables siliceux, cette valeur peut affecter le calcul volumétrique des mélanges. Elle impose un ajustement des dosages afin de maintenir la densité et la performance attendue des mortiers contenant des ajouts comme la pouzzolane ou le laitier.

II.5.2.1.3) Porosités, Compacité et L'indice des vides :

II.5.2.1.3.1) La porosité :

Objectif de l'essai :

Calculer la porosité absolue, qui représente le pourcentage du volume total occupé par les vides.

Formule :
$$P (\%) = \left(1 - \frac{\gamma}{\rho}\right) \times 100$$

II.5.2.1.3.2) La compacité :

Objectif de l'essai :

La compacité représente le degré d'occupation du volume par les grains solides. Elle est complémentaire à la porosité.

Formule :
$$C (\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100 \quad \text{ou} \quad C (\%) = 1 - P$$

II.5.2.1.3.3) L'indice des vides :

Objectif de l'essai :

Déterminer l'indice des vides du sable utilisé, qui exprime le rapport entre le volume des vides et le volume des solides dans un échantillon granulaire sec non compacté.

Principe de l'essai :

L'indice des vides est calculé à partir de la masse volumique absolue (ρ_{ab}) et la masse volumique apparente (ρ_{app}) selon la formule :

$$e = \left(\frac{\rho_{ab}}{\rho_{app}} \right) (\%)$$

Matériel utilisé :

- Cylindre gradué de 1 L
- Balance électronique

- Entonnoir
- Sable sec
- Tige pour nivellement

Procédure de l'essai :

1. Peser le cylindre vide.
2. Remplir le cylindre avec du sable sec par versement libre sans vibration.
3. Nivelier la surface du sable et peser l'ensemble.
4. Calculer la masse du sable et en déduire la masse volumique apparente avec la formule qui on a déjà vu dans les essais précédents.
5. Appliquer la formule pour obtenir l'indice des vides.

Donc les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.11: Porosité, compacité et l'indice des vides de sable.

Porosité, Compacité, L'indice des vides de sable		
Porosité (%)	Compacité (%)	L'indice des vides (%)
28.34	71.654	0.395

Commentaire :**La porosité:**

(28,30 %) : Un taux de porosité relativement élevé suggère une présence importante de vides entre les grains. Cela peut influencer négativement l'absorption d'eau et la résistance mécanique, nécessitant un contrôle précis du rapport E/C pour assurer la durabilité des matériaux élaborés.

La compacité:

(71,70 %) : Ce taux reflète une bonne capacité de compactage du sable, favorable à la formation d'un squelette granulaire stable. Cela peut améliorer la résistance à la compression et optimiser l'efficacité des ajouts minéraux dans les formulations testées.

L'indice des vides:

(0,395%) : Cette valeur confirme la structure poreuse modérée du sable. Dans le contexte du présent travail, elle doit être considérée pour le dimensionnement des mélanges afin de limiter les vides résiduels et améliorer la densité des matériaux.

II.5.3) Les caractéristiques physico-chimiques :**II.5.3.1) L'équivalent de sable [NFP 18-597, EN 933-8] :****Objectif de l'essai :**

L'essai d'équivalent de sable a pour objectif d'évaluer la propreté d'un sable, c'est-à-dire sa teneur relative en fines argileuses susceptibles d'altérer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons et mortiers. Il permet de quantifier la proportion d'éléments argileux, limoneux ou organiques par rapport aux grains de sable propre.

Matériel utilisé :

- Cylindre gradué (**hauteur 430 mm**)
- Éprouvette graduée (**500 ml**)
- Solution d'ESSAI (eau distillé)
- Agitateur mécanique ou manuel
- Bouchon et règle pour la mesure
- Piston
- Chronomètre
- Balance (pour la préparation des solutions)

Principe de l'essai :

Une suspension de sable dans une solution normalisée est laissée au repos. Les particules lourdes (sable) se déposent rapidement au fond, tandis que les fines (argiles) forment une colonne au-dessus. L'équivalent de sable est le rapport entre la hauteur de sable sédimenté et la hauteur totale des matériaux (sable + fines).

Procédure expérimentale :

1. Remplir l'éprouvette d'eau distillé jusqu'au premier repère.
2. A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable **120g** dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de chasser les bulles d'air et favorise le moulage de l'échantillon.
3. Laisser reposer pendant **10 min**.
4. Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer **90 cycles de 20 cm** de secousses horizontal en **30 s** à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
5. Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec l'eau distillé au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
6. Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
7. Après **20 min** de dépôt, lire la hauteur ***h* 1**, de niveau supérieure de floculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.



Photo II.6 : Essais d'équivalent de sable.

8. Mesuré également avec la règle la hauteur ***h* 2** compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$ESV = h2 \frac{h2}{h1} \times 100\% \text{ Ou } (h2 < h1)$$

h_1 : Hauteur du sable plus flocculat

h_2 : Hauteur du sable

9. Introduire le piston de l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$Esp = h'_2 \frac{h_2}{h_1} \times 100\% \text{ Ou } (h'_2 < h_1)$$

h_1 : Hauteur du sable plus flocculat

h'_2 : Hauteur du sable.

Données et résultats :

Tableau II.12: Les résultats d'équivalent de sable.

L'équivalent de sable				
h_1 (cm)	h_2 (cm)	h'_2 (cm)	ES_v (%)	ESp (%)
11.46	9.026	8.3	78.76	72.42

Commentaire :

A permis d'évaluer la propreté du sable utilisé, notamment sa teneur en fines (argile, limon). Les résultats obtenus l'on observe que les valeurs mesurées de l'équivalent de sable sont respectivement de 78,76 % et 72,42 %, avec une moyenne (Esp) de 72,42 %, une valeur d'équivalent de sable supérieure à 70 % indique une qualité satisfaisante du sable, caractérisée par une faible teneur en particules fines. Par conséquent, le sable analysé peut être considéré comme propre et apte à être utilisé dans les formulations de mortiers et de bétons, sans risque majeur de détérioration des propriétés mécaniques ou de durabilité. Ces résultats confirment donc la conformité du sable aux exigences des spécifications techniques, ce qui permet d'assurer une bonne performance des matériaux à l'état frais et durci.

II.6) Les caractéristiques des compositions de ciment :

II.6.1) Les pourcentages des ajouts dans chaque composition :

Tableau II.13: Les pourcentages des ajouts dans chaque composition.

Composition	Les pourcentages des ajouts et du ciment (%)	Les quantités des ajouts et de ciment (g)
Témoin	85 Ciment (CRS)	450
1	85 Ciment (CRS) + 15 Laitier	450 Ciment + 67.5 Laitier
2	85 Ciment (CRS) + 10 Laitier +5 Pouzzolane	450 Ciment + 45 Laitier+ 22.5 Pouzzolane
3	85 Ciment (CRS) + 5 Laitier +10 Pouzzolane	450 Ciment + 22.5 Laitier + 45 Pouzzolane
4	85 Ciment (CRS) +15 Pouzzolane	450 Ciment + 67.5 Pouzzolane



Photo II.7: Différentes compositions du ciment utilisé.

II.6.2) La masse volumique apparente :



Photo II.8: La masse volumique apparente de ciment.

La masse volumique apparente est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_1 - M_2) / V \quad (\text{g/cm}^3).$$

Avec : M_1 : La masse de récipient vide (g).

M_2 : La masse de récipient plein (g).

V : Le volume de récipient (cm^3).

Tableau II.14: La masse volumique apparente des compositions.

Composition	M_1 (g)	M_2 (g)	V (cm^3)	ρ_{app} (g/cm^3)
Témoin	157.91	322.99	158.61	2.79
C_1		328.88		3.01
C_2		326.92		3.10
C_3		323.98		3.53
C_4		327.41		2.92

II.6.3) La masse volumique absolue :



Photo II.9: Les étapes d'essai de la masse volumique absolue.

La masse volumique absolue est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{ab} = M_4 / V_c \quad (g/cm^3)$$

Avec : $V_c = M_T / \rho_T = M_3 - (M_5 - M_4) / \rho_T \quad c (cm^3)$

$$\rho_T = (M_T - M_1) / V \quad (g/cm^3)$$

$$V = M_3 - M_1 / \rho_e \quad (cm^3)$$

ρ_{ab} : La masse volumique absolue de ciment.

ρ_T : La masse volumique absolue de liquide neutre.

V_c : Le volume de liquide neutre.

V : Le volume de pycnomètre.

M_T : La masse de liquide neutre.

M_1 : La masse de pycnomètre vide.

M_2 : La masse de pycnomètre remplie de l'eau distillée.

M_3 : La masse de pycnomètre remplie de liquide neutre.

M_4 : La masse de ciment.

M_5 : La masse de pycnomètre remplie de ciment +le liquide neutre.

CHAPITRE II: Les caractéristiques des matériaux utilisées

Tableau II.15: Les masses nécessaires pour calculer la masse volumique absolue de ciment.

M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	M_4 (g)
54.75	153.95	128.19	35

Tableau II.16: La masse volumique absolue des compositions.

Composition	M_5 (g)	M_T (g)	V (cm^3)	V_c (cm^3)	ρ_T (g/cm^3)	ρ_{ab} (g/cm^3)
Témoin	154.05	9.14	99.29	12.44	0.7344	2.81
C_1	154.66	8.53		11.61		3.01
C_2	154.92	8.27		11.26		3.10
C_3	155.90	7.29		9.92		3.52
C_4	154.40	8.79		11.96		2.92

II.6.4) Essai de Consistance de la pâte de ciment EN 196-3 :



Photo II.10: Consistance normale de ciment.

Introduction :

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. En générale, on utilise l'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196 -3.

But de l'essai :

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier L'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pates étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée.

Principe de l'essai :

La consistance est déterminée en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat ».

Equipement nécessaire :

- un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).
- un appareil de Vicat. Cet appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de 10 mm de diamètre, la partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible).
- une balance permettant de peser à 1g près.
- un chronomètre précis à 1s près.

Conduite de l'essai :

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée :

Tableau II.17 : La composition de pate de prise.

Masse de ciment (g)	Masse d'eau (g)	Rapport $\left(\frac{E}{C}\right)$	Rapport $\left(\frac{C}{E}\right)$
500	Eau = 26.5 (%)=132.5	0.265	3.773

- Introduire la quantité d'eau choisie dans la cuve du malaxeur.
 - Peser 500g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur.
 - Mettre immédiatement le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant 90 s.
 - Arrête le malaxeur pendant 15 s.
 - Ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au-delà de la zone de malaxage.
 - Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.
 - La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive ; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et -vient effectuer avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.
 - Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base. Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.
- * Si $(d) = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée.
(Consistance normalisée)

Les résultats :

Tableau II.18: Résultats de d'essai consistance normale.

N° d'essai	Quantité d'eau ajoutée	Profondeur de pénétration (mm)	Observation
1	25.5 %	9.5	ferme
2	27 %	11	Proche à la norme
3	26.5 %	12	Consistance normale

II.6.5) Essai de prise de la pâte de ciment EN 196-3 :**Introduction :**

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus au moins malléable voire plastique, mais au bout d'un certain temps, le matériau devient de plus en plus difficile à travailler et sa température augmente : il fait prise et devient de plus en plus solide

But de l'essai :

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : Le début de prise et la fin de prise.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.

- Lorsque sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesure à partir du début du malaxage, est appelé « temps de début de prise ».

- Le « temps de fin de prise » est celui au bout du que l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

Equipement nécessaire :

- L'essai doit se déroule dans une salle, dont la température est de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90 %. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr /mn et rapide 285 tr /mn).
- Appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.
- Balance précise à 0,1 g près.
- Chronomètre précise à 0,1s près.

Conduite de l'essai :

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée : $C=500\text{g}$ et $E=125\text{g}$

- Introduire la quantité d'eau choisie dans la cuve du malaxeur. (Ici, on peut déterminer $E/C=0.25$)
- Peser 500g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur.
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant 90 s.
- Arrête le malaxeur pendant 15 s.
- Ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au-delà de la zone de malaxage.
- Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.
- La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive ; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectuer avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil l'extrémité de Vicat.

- Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant de la sonde et de la plaque de base. Le temps zéro est celui où l'eau est ajoutée au ciment.
- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~10 - 15 mn) jusqu'à ce que $d=4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné.
- Retourner le moule tronconique du ciment déjà utilisé pour l'essai de début de prise. Ainsi, les essais de fin de prise soient faits l'autre face de l'échantillon.
- Munir l'aiguille d'un accessoire annulaire pour faciliter l'observation des faibles pénétrations de l'aiguille.
- Enregistrer à 15 min près, le temps au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois qu'à 0.5 mm dans l'éprouvette.
- Le temps de fin de prise du ciment étudié est le temps au bout duquel l'accessoire annulaire cesse laisser une trace sur l'éprouvette.



Photo II.11: La prise de ciment.

Résultats :

La composition C_1 :

Tableau II.19: Début de prise de C_1 .

Début de prise	
Temps	Hauteur (mm)
11 :28	40
11 :43	40
11 :58	38
12 :13	29
12 :28	19
12 :43	14
12 :54	13
13 :00	11.5
13 :17	9.5
13 :23	7

Tableau II.20: Fin de prise de C_1 .

Fin de prise	
Temps	Hauteur (mm)
13 :36	0
13 :47	0
14 :00	1

La composition C_2 :

Tableau II.21: Début de prise de C_2 .

Début de prise	
10 :45	0
10 :55	0
11 :05	1
11 :15	1.5
11 :32	25
11 :48	19
12 :10	12
12 :30	9
12 :57	5

Tableau II.22: Fin de prise de C_2 .

Fin de prise	
13 :05	0
13 :10	0
13 :20	0
13 :23	1

La composition C_3 :

Tableau II.23 : Début de prise de C_3 .

Temps (min)	Hauteur (mm)
11 :50	0
12 :05	35
12 :20	31.5
12 :40	24

13 :00	20
13 :30	10
13 :40	6
13 :57	4.5

Tableau II.24: Fin de prise de C_3 .

Temps (min)	Hauteur (mm)
14 :02	0
14 :07	0
14 :18	0
14 :26	1

La composition C_4 :

Tableau II.25 : Début de prise de C_4 .

Temps (min)	Hauteur (mm)
9 :55	0
10 :00	0
10 :15	2
10 :34	6
10 :55	8
11 :10	10
11 :28	4

Tableau II.26: Fin de prise de C_4 .

Temps (min)	Hauteur (mm)
11 :35	0
11 :43	1

II.7) Confection de mortier :

II.7.1) Méthodologie des essais :

Confection des éprouvettes et condition de conservation (NF EN 196-1) :

Introduction :

Le mortier sert à déterminer certaines caractéristiques du liant (ciment) ou du mortier: la résistance à la compression et à la flexion.

Objectif :

- Confectionner des éprouvettes de mortier (4x4x16) cm³, serrage (vibration) et conservation dans l'eau.
- Déterminer la résistance à la compression et à la flexion.

Matériels nécessaires :

- Balance
- Moules (4x4x16) cm³
- Appareil à chocs - Malaxeur normalisé

**Photo II.12:** Malaxeur et les moule de mortier et l'appareille à chocs.

Matériaux :

- Sable - Ciment
- Les ajouts minéraux (laitier de haut fourneau et pouzzolane naturelle) - Eau.

Mode opératoire :

- Peser une quantité de sable
- Peser une quantité de ciment
- la quantité d'eau est déterminée selon le rapport E/C
- Réaliser l'opération de malaxage
- Après le malaxage, le mortier est introduit dans les moules (trois éprouvettes).
- Réaliser l'opération de serrage (vibration) à l'aide de l'appareil à chocs.
- Araser les moules pour enlever le surplus du mortier
- Démoulage des échantillons après 24 heures
- Entreposer les échantillons dans l'eau à 20 ± 1 °C jusqu'au moment de l'essai de rupture



Photo II.13: Mortier après le malaxage.

CHAPITRE II: Les caractéristiques des matériaux utilisées

Tableau II.27: Composition des mélanges de mortier pour des dosages différents des ajouts minéraux.

Les compositions	Les ajouts (g)	Le ciment (g)	Le sable (g)	L'eau (g)
Témoin	/	450	1200	225
C ₁	67.5 L	382.5		
C ₂	45 L +22.5 PZ			
C ₃	22.5 L+45 PZ			
C ₄	67.5 PZ			

II.7.2.1) Essais sur mortier (selon la norme NF EN 196-1) :

II.7.2.1.1) A l'état frais :

II.7.2.1.1.1) Essai d'étalement selon la norme NF P 18-450 et P15-437(La maniabilité):

Détermination de la consistance (maniabilité) des mortiers frais

Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer l'étalement d'un mortier frais après 15 chocs verticaux sur une table normalisée. Il permet d'évaluer la maniabilité du mortier en simulant les conditions de mise en œuvre sur chantier.

Matériels utilisés :

Table d'étalement conforme à la norme (diamètre : 300 mm, amplitude des chocs : 10 mm $\pm$ 0,2 mm)

Trémie en forme de cône tronqué (hauteur : 60 mm, diamètre supérieur : 70 mm, diamètre inférieur : 100 mm)

Spatule métallique

Chronomètre

Mortier fraîchement préparé

Procédure expérimentale :

1. Nettoyer soigneusement la table d'étalement et la trémie.
2. Placer la trémie centrée sur la table.
3. Remplir la trémie en deux couches de mortier, en tassant légèrement chaque couche à l'aide de la spatule pour éviter les bulles d'air.
4. Araser la surface du mortier avec une spatule pour obtenir une surface plane.
5. Retirer la trémie verticalement et sans choc en moins de 5 secondes.
6. Effectuer 15 chocs verticaux de la table à l'aide du levier normalisé, à une fréquence de 1 coup par seconde.
7. Mesurer immédiatement les deux diamètres orthogonaux de l'étalement du mortier à l'aide d'une règle.
8. Calculer la moyenne des deux valeurs pour obtenir l'étendue d'étalement.



Photo II.14: L'étalement de mortier.

Les résultats obtenus:

Tableau II.28: Les résultats obtenus de l'essai de maniabilité.

Composition	Diamètre (mm)
Témoin	16.5
1	18.5
2	17
3	15.5
4	14.5

II.7.2.1.2) A l'état durci :

II.7.2.1.2.1) Essais non destructif :

II.7.2.1.2.1.1) Essai de la vitesse des impulsions ultrasonores (UPV) – Vitesse de propagation du son selon la norme (NF EN 12504-4):

L'essai de vitesse des impulsions ultrasonores est une méthode non destructive permettant d'évaluer l'homogénéité, la compacité et l'intégrité du béton ou du mortier durci. Il repose sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores à travers un matériau solide.

Principe de l'essai :

Une onde ultrasonore est générée par un transducteur émetteur placé sur une face de l'éprouvette, et captée par un transducteur récepteur placé sur la face opposée. La vitesse de propagation (V) est calculée à partir du temps de parcours (t) et de la distance entre les deux sondes (L).

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{où :}$$

V = vitesse de l'onde (m/s)

L= longueur du trajet (m)

t = temps de parcours de l'onde (s)

Procédure expérimentale :

1. Les deux sondes (émettrice et réceptrice) sont placées en contact direct avec la surface de l'éprouvette ou de la structure, avec un couplage à l'aide d'un gel pour éviter les interférences d'air.
2. Une série de mesures est effectuée pour garantir la fiabilité.
3. La vitesse est comparée à des valeurs de référence pour juger de l'homogénéité du matériau



Photo II.15: Vitesse de sens.

II.7.2.1.2.1.2) Essai d'absorption totale d'eau selon la norme NF P (18-459):

Essai d'absorption totale d'eau L'essai d'absorption totale d'eau permet de déterminer la quantité maximale d'eau que peut absorber un matériau cimentaire (mortier ou béton) après un séchage complet, ce qui renseigne sur sa porosité accessible à l'eau.

Il s'agit d'un indicateur important de la durabilité du matériau.

Norme de référence :

Pour les mortiers : NF P 18-459 (Méthode de détermination de la porosité et de l'absorption d'eau)

Principe de l'essai :

L'essai consiste à comparer la masse sèche et la masse saturée d'une éprouvette après immersion dans l'eau pendant une durée suffisante (généralement 48 heures) pour garantir la saturation complète.

Procédure expérimentale :

1. Séchage des éprouvettes dans une étuve à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à obtention d'une masse constante. La masse sèche est notée m_1 .
2. Refroidissement à température ambiante des éprouvettes dans un dessiccateur.
3. Immersion complète des éprouvettes dans l'eau pendant 48 heures.
4. Essuyage de la surface avec un chiffon humide pour éliminer l'excès d'eau.
5. Pesée immédiate des éprouvettes saturées. La masse saturée est notée m_2 .

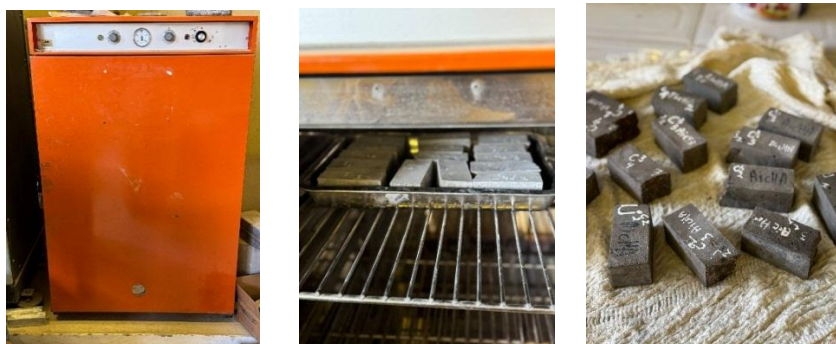


Photo II.16: La conservation 3 jours dans l'étuve à 105°C .

Calcul de l'absorption totale :

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{où :}$$

A : taux d'absorption totale (%)

m_1 : La masse sèche de l'éprouvette (g)

m_2 : La masse à l'état saturé (g)

II.7.2.1.2.2) Essais non destructif :

II.7.2.2.3.1) Résistance à la flexion :

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³. Si F_f est la charge de rupture à la flexion. La contrainte de traction sur la face inférieure de l'échantillon est : La contrainte de flexion est :

$$R_f = 1.5 F_f l / b^3 \quad \text{Si}$$

F_f : est exprimé en newtons (N)

R_f : est exprimé en MPa avec :

$$R_f \text{ (MPa)} = 2.34 \times 10^{-3} F_f \text{ (N)}$$



Photo II.17: Essais de résistance à la flexion.

II.7.2.3.2) Résistance à la compression

La résistance à la compression est réalisée sur les demi-prismes après les essais de flexion La contrainte de compression est : $R_c = (F_c / b^2)$

Si F_c est exprimé en newtons (N), R_c est exprimé en MPa avec :

$$R_c \text{ (MPa)} = F_c / 1600$$



Photo II.18: Essais de résistance à la compression.

II.8) Conclusion :

Ce deuxième chapitre a permis de présenter de manière détaillée les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, en mettant en évidence leurs principales caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. Une attention particulière a été accordée au ciment résistant aux sulfates, à la pouzzolane naturelle et au laitier de haut fourneau, en raison de leur rôle essentiel dans l'amélioration des performances du ciment à court et moyen terme.

Par ailleurs, les protocoles expérimentaux adoptés pour l'élaboration des mortiers, ainsi que les essais réalisés pour évaluer leurs propriétés, ont été décrits avec rigueur, en se basant sur des normes normalisées et des références scientifiques reconnues. Ces essais visent à analyser l'évolution des caractéristiques mécaniques et physiques des mélanges cimentaires en fonction des types et des proportions d'ajouts minéraux incorporés.

Les résultats issus de ces essais feront l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre suivant. Ce dernier sera consacré à la présentation, l'interprétation et la discussion des résultats obtenus, dans le but de mieux comprendre l'influence des ajouts de pouzzolane et de laitier sur les performances globales du ciment étudié.

CHAPITRE III :
**Analyse est interprétation
des résultats**

III.1) Introduction:

Ce chapitre est consacré à la présentation, à l'organisation et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus tout au long de cette étude. Il vise à comparer les performances des différentes compositions élaborées, en s'appuyant sur une série d'essais normalisés réalisés à différents âges de durcissement.

Les mesures effectuées, telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion ainsi que l'absorption d'eau, permettent de mettre en évidence l'évolution du comportement des mortiers étudiés. L'analyse comparative de ces résultats offre une meilleure compréhension de l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés globales des matériaux.

Ce chapitre permet ainsi de dégager la formulation la plus performante en fonction de l'âge du matériau, tout en tenant compte des objectifs de durabilité, d'efficacité et d'optimisation des ressources.

III.2) Interprétation et analyse des résultats des caractéristiques des compositions de ciment:

III.2.1) La masse volumique apparente et absolue:

Tableau III. 1: La masse volumique apparente et absolue des compositions de ciment.

composition	La masse volumique apparente (g/cm ³)	La masse volumique absolue (g/cm ³)
1 (Témoin)	1.047	2.79
2	1.072	3.01
3	1.065	3.10
4	1.041	3.53
5	1.069	2.92

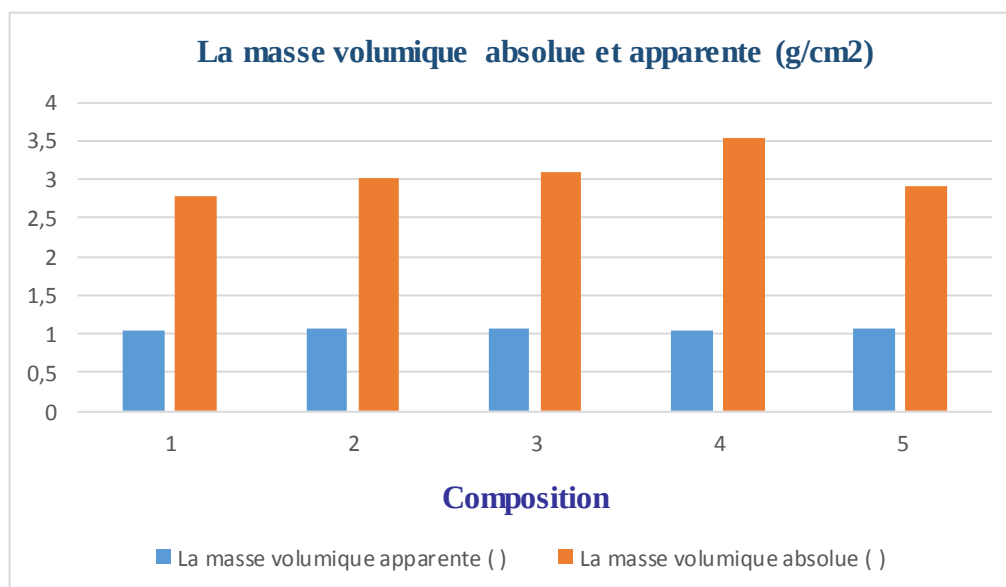


Figure III.1 : La masse volumique apparente et absolue des différentes compositions.

Commentaire:

L'échantillon de Témoin présente une masse volumique apparente de $1,0747 \text{ g/cm}^3$ et une masse volumique absolue de $2,79 \text{ g/cm}^3$. Les mélanges modifiés affichent des masses volumiques apparentes plus faibles, variant entre $1,041 \text{ g/cm}^3$ (mélange 3) et $1,072 \text{ g/cm}^3$ (mélange 1), ce qui reflète une augmentation de la porosité due à l'ajout de matériaux pouzzolaniques ou de laitier. Le mélange 3, en particulier, montre la valeur apparente la plus basse, traduisant une structure plus poreuse, susceptible d'affecter négativement la résistance mécanique à court terme, mais pouvant permettre une meilleure évolution à long terme grâce aux réactions pouzzolaniques progressives.

En parallèle, les masses volumiques absolues des mélanges sont supérieures à celle de la référence, atteignant jusqu'à $3,53 \text{ g/cm}^3$ pour le mélange 3. Cette augmentation est attribuée à l'incorporation d'additions minérales plus denses que le ciment seul. Cela peut favoriser une compacité interne plus élevée, contribuant à améliorer la durabilité et la résistance à moyen et long terme, malgré un impact potentiel sur l'hydratation initiale. En résumé, la diminution de la masse volumique apparente combinée à une augmentation de la masse volumique absolue met en évidence l'influence des additions sur la microstructure du mortier, avec un compromis entre porosité, compacité et performance dans le temps.

III.2.3) La consistance normale:

Tableau III. 2: Détermination de la consistance normale des compositions de ciment.

N° d'essai	Quantité d'eau ajoutée	Profondeur de pénétration (mm)	Observation
Essai n°1	25.5 %	9.5	ferme
Essai n°2	27 %	11	Proche à la norme
Essai n° 3	26.5 %	12	Consistance normale

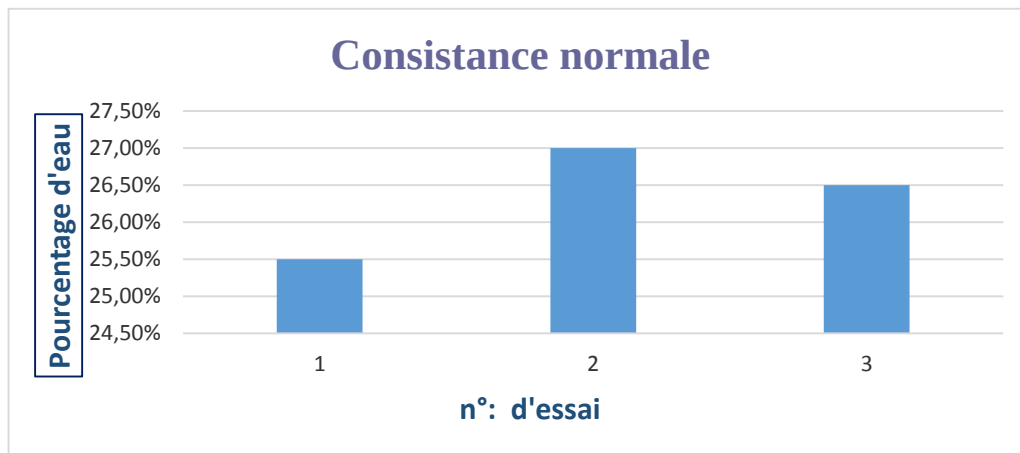


Figure III.2: La consistance normale des compositions de ciment.

III.2.4) Début de prise, Fin de prise:

Tableau III. 3 : Le début et la fin de prise des compositions de ciment.

Composition	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
C ₁	171	271
C ₂	184	209
C ₃	227	250
C ₄	190	205

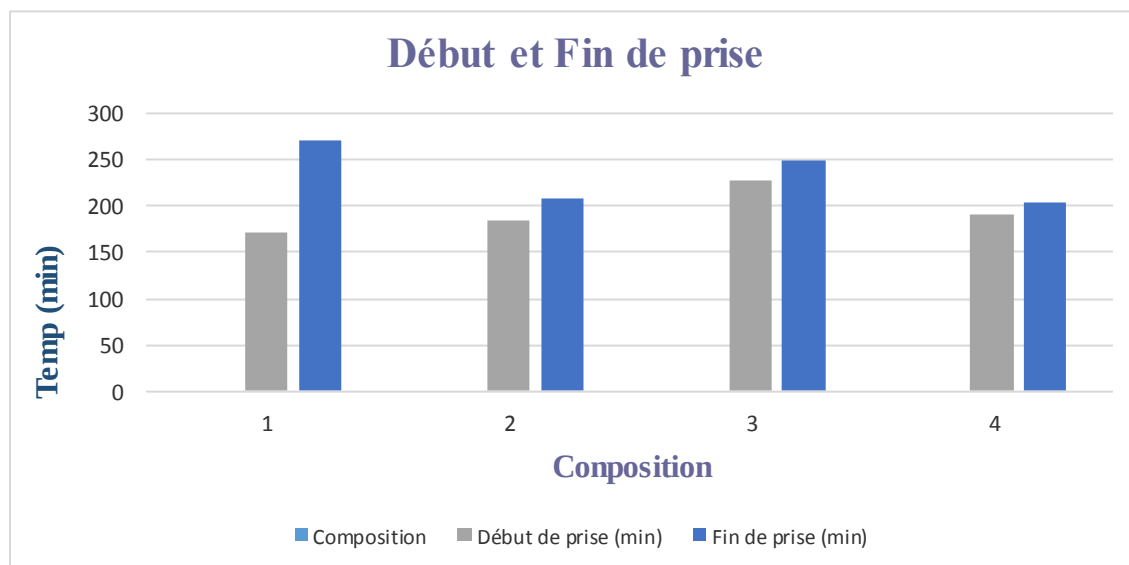


Figure III.3 : Début et Fin de prise des différentes compositions de ciment.

Comentaire :

Les temps de prise de Début et Fin varient selon les proportions d'ajouts, influençant la réactivité du ciment. Le mélange C1 montre une prise initiale rapide (2 h 50 min) et une prise finale tardive (4 h 30 min), favorisant un durcissement progressif et une bonne durabilité. En revanche, C2 présente une prise initiale plus longue (3 h 04 min) mais une prise finale plus courte (3 h 29 min), indiquant un durcissement plus rapide après prise, ce qui peut affecter la résistance initiale. Les mélanges C3 et C4 affichent des temps modérés, assurant un bon équilibre entre maniabilité et développement de résistance, promettant une durabilité améliorée sur le moyen et long terme.

III.3) Interprétation et analyse des résultats de mortier:

III.3.1) A l'état frais:

III.3.1.1) La maniabilité:

Tableau III. 4: La variation d'étalement des différentes compositions.

Composition	Diamètre (mm)	Commentaires
1(Témoin)	16.5	Bonne maniabilité
2	18.5	Très bonne maniabilité
3	17	Bonne maniabilité
3	15.5	Maniabilité moyenne
5	14.5	Maniabilité faible à moyenne

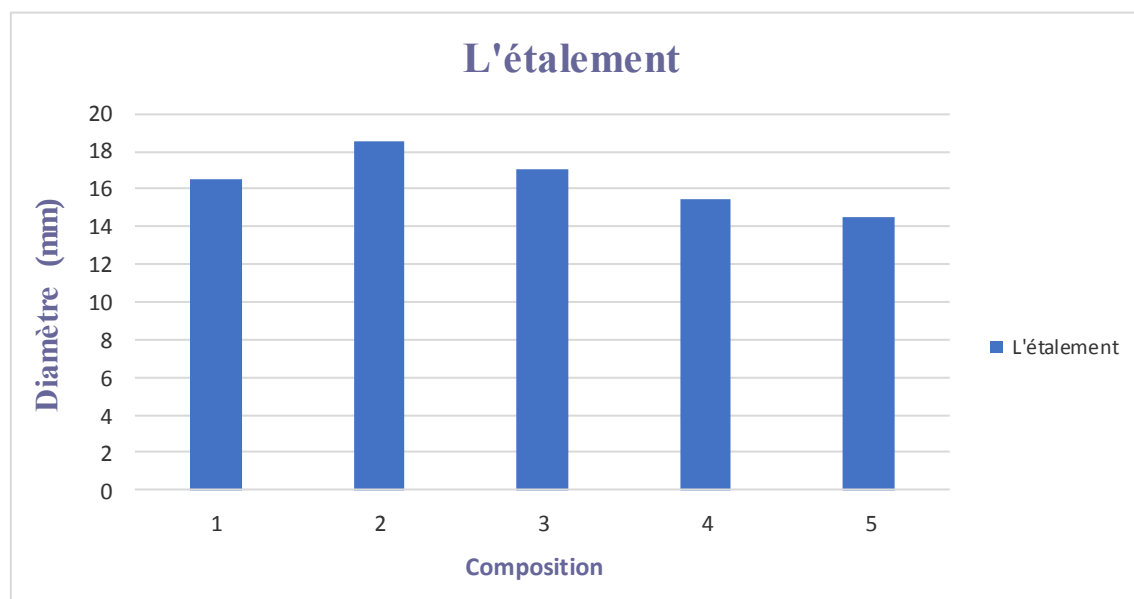


Figure III.4 : La variation de maniabilité des différentes.

Commentaire :

L'essai d'étalement a été réalisé afin d'évaluer la maniabilité des différentes compositions de mortier. Les résultats obtenus montrent une variabilité significative du diamètre d'étalement selon la formulation. La composition 2 affiche le diamètre le

plus élevé (18,5 mm), ce qui traduit une très bonne maniabilité. Cela peut s'expliquer par un effet lubrifiant ou une meilleure répartition granulaire des ajouts utilisés dans cette formulation. La composition témoin (1) ainsi que la composition 3 présentent également une bonne maniabilité, avec des diamètres de 16,5 mm et 17 mm respectivement. En revanche, la composition 4 montre une maniabilité moyenne (15,5 mm), tandis que la composition 5 enregistre le diamètre le plus faible (14,5 mm), indiquant une maniabilité faible à moyenne. Cette diminution pourrait être liée à une absorption plus importante de l'eau ou à une activité pouzzolanique plus marquée, influençant la rhéologie du mélange au jeune âge.

III.3.2) A l'état durci:

III.3.2.1) Essai non destructif:

III.3.2.1.1) La Pert masse volumique des éprouvettes:

Tableau III. 5: Pert de masse volumique des éprouvettes.

composition	Pert de masse volumique (%)			
	7 jours	14 jours	28 jours	40 jours
Témoin	0.00015	0.00006	0.00012	0.00010
C_1	0.00014	0.0001	0.00014	0.00012
C_2	0.0001	0.00363	0.00137	0.00015
C_3	0.00038	0.0002	0.00024	0.00005
C_4	0.00013	0.00028	0.00001	0.00012

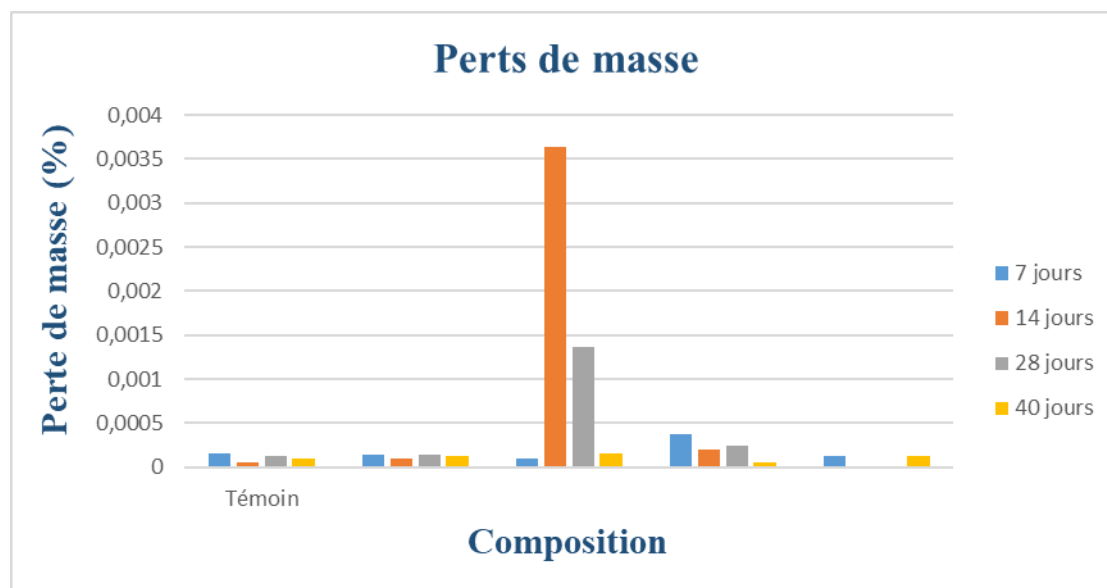


Figure III.5 : La perte de masse volumique des éprouvettes.

Commentaire :

Les résultats de la perte de masse volumique à 7, 14, 28 jours et c à 40 jours montrent que toutes les formulations présentent une bonne stabilité à court terme, avec des pertes très faibles. Toutefois, le mélange C2 affiche une augmentation notable de La perte à 14 jours, suggérant une sensibilité accrue à la dégradation précoce. À moyen et long terme, la plupart des mélanges stabilisent leurs pertes, avec une meilleure performance pour le mélange C3, grâce à la synergie entre pouzzolane et laitier. En revanche, C2 conserve la perte la plus élevée, ce qui pourrait nuire à sa durabilité future. Ainsi, ces résultats confirment que la nature et la proportion des ajouts influencent directement la stabilité et la durabilité du ciment, avec une supériorité des mélanges riches en pouzzolane et laitier pour une meilleure performance à long terme.

III.3.2.1.2) La variation de l'absorption totale des éprouvettes :

Tableau III.6 : l'absorption totale des éprouvettes.

l'absorption totale des éprouvettes (%)				
Composition	7 jours	14 jours	28 jours	40 jours
Témoin	0.161	0.1790	0.2332	0.240

C_1	0.166	0.1789	0.2204	0.230
C_2	0.170	0.1849	0.2226	0.235
C_3	0.184	0.2062	0.2153	0.225
C_4	0.175	0.1956	0.2514	0.260

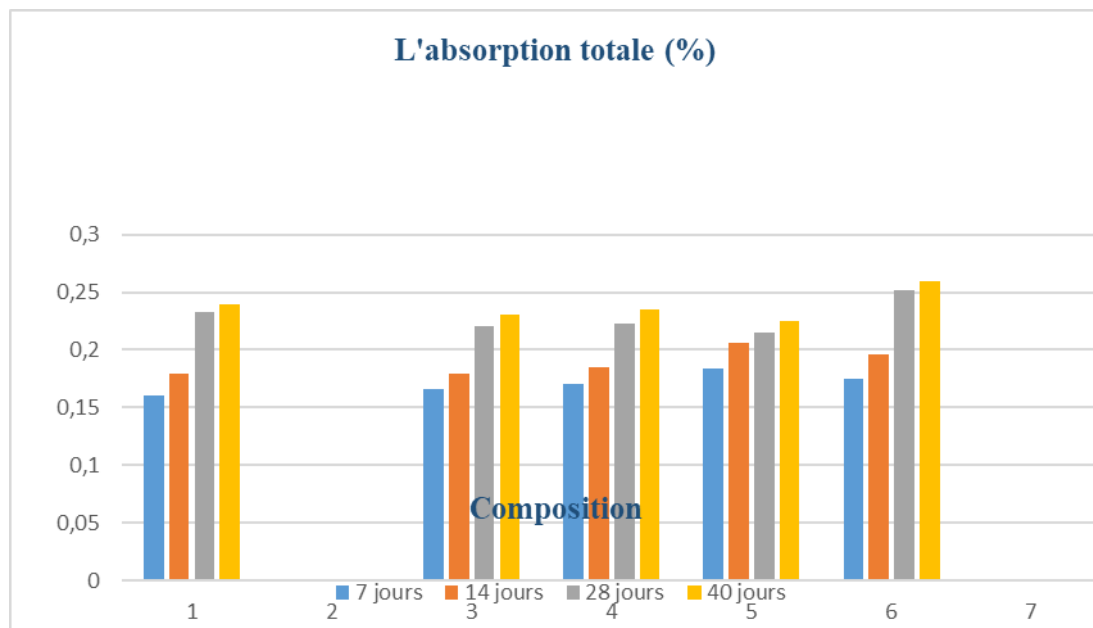


Figure III.6: L'absorption totale des éprouvettes.

III.3.2.1.3) La vitesse de sens des éprouvettes :

Tableau III. 7: La vitesse de sens des éprouvettes.

composition	Temps	Vitesse (m/s)
T (7jours)	53	2950
T (14 jours)	50.23	3236.66
T (28jours)	41.3	3876.66
T (40 jours)	39	3950
C_1 (7 jours)	51	3100
C_1 (14 jours)	48.73	3286.66
C_1 (28 jours)	41.93	3820
C_1 (40 jours)	40.5	3900.16
C_2 (7 jours)	48.5	3600
C_2 (14 jours)	47.5	3613.33
C_2 (28 jours)	43.1	3746.66
C_2 (40 jours)	42	3800.06
C_3 (7 jours)	46.7	3600
C_3 (14 jours)	44.46	3613.33
C_3 (28 jours)	47.76	3200
C_3 (40 jours)	44	3200.9
C_4 (7 jours)	47.8	3500
C_4 (14 jours)	46.6	3446.66
C_4 (28 jours)	45.76	3510
C_4 (40 jours)	43.7	3550.36

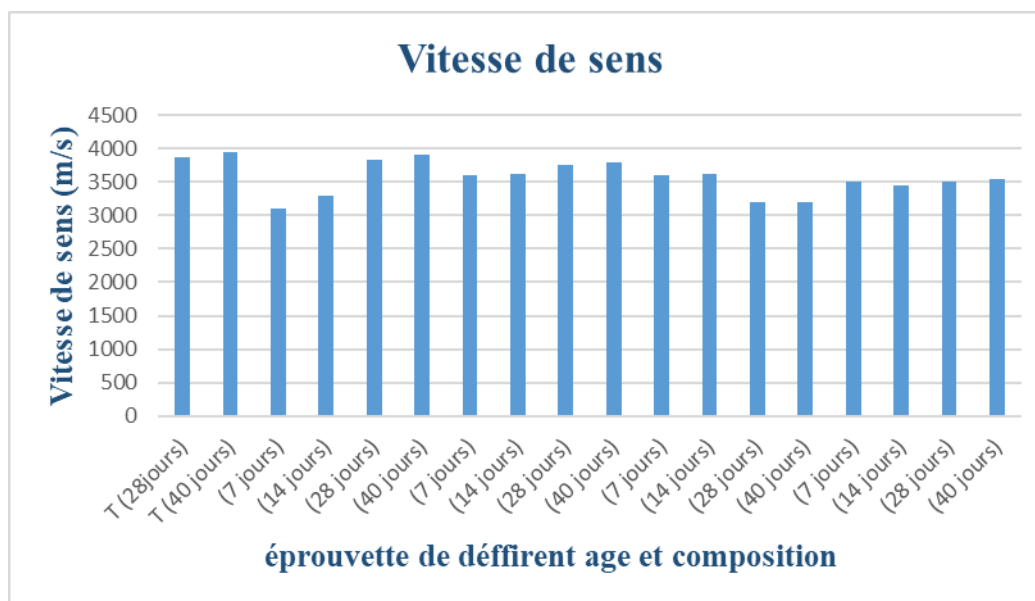


Figure III.7: La vitesse de sens des éprouvettes.

Commentaire :

Les résultats de la vitesse de propagation ultrasonore montrent une amélioration progressive de la compacité et de la rigidité des mélanges avec l'âge du ciment.

À court terme (7 jours) : les vitesses restent relativement faibles, reflétant une phase initiale de durcissement avec une porosité importante. Cependant, les mélanges contenant de la pouzzolane et du laitier, notamment les mélanges C2 et C3, présentent des vitesses supérieures, indiquant une meilleure compacité précoce.

À 14 jours, une augmentation notable des vitesses et une réduction du temps de transit témoignent d'une densification rapide. Les formulations enrichies en pouzzolane et laitier montrent une structure plus homogène et résistante, favorable à la durabilité à moyen terme.

À moyenne terme (28 jours) : la majorité des mélanges atteignent des vitesses élevées, signe d'un durcissement avancé et d'une bonne maturité. Bien que les différences entre mélanges diminuent, certaines formulations, telles que C3, affichent une vitesse légèrement inférieure, possiblement liée à des microstructures spécifiques dues aux proportions d'additifs.

À long terme (40 jours), la vitesse ultrasonore se stabilise ou progresse lentement, confirmant la consolidation des propriétés mécaniques à long terme. Les mélanges

initialement les plus performants conservent une compacité supérieure, synonyme de meilleure résistance à la fissuration et à l'usure.

En résumé, l'analyse de la vitesse ultrasonore à différents âges souligne le rôle essentiel des ajouts de pouzzolane et de laitier dans l'amélioration progressive de la compacité et de la durabilité du ciment, avec des effets positifs sur le court, moyen et long terme.

III.3.2.2) Essai destructif:

III.3.2.2.1) La résistance à la Compression:

Tableau III.8 : La variation de la résistance à la compression des éprouvettes réservées sous l'eau.

Composition	Résistance à la compression (MPa)			
	7 jours	14 jours	28 jours	40 jours
Témoin	35.10	23.86	31.87	15.46
1	31.72	30.99	28.50	35.23
2	32.16	30.89	24.90	22.63
3	29.19	17.65	30.913	20.39
4	3072	35.15	23.54	25.93

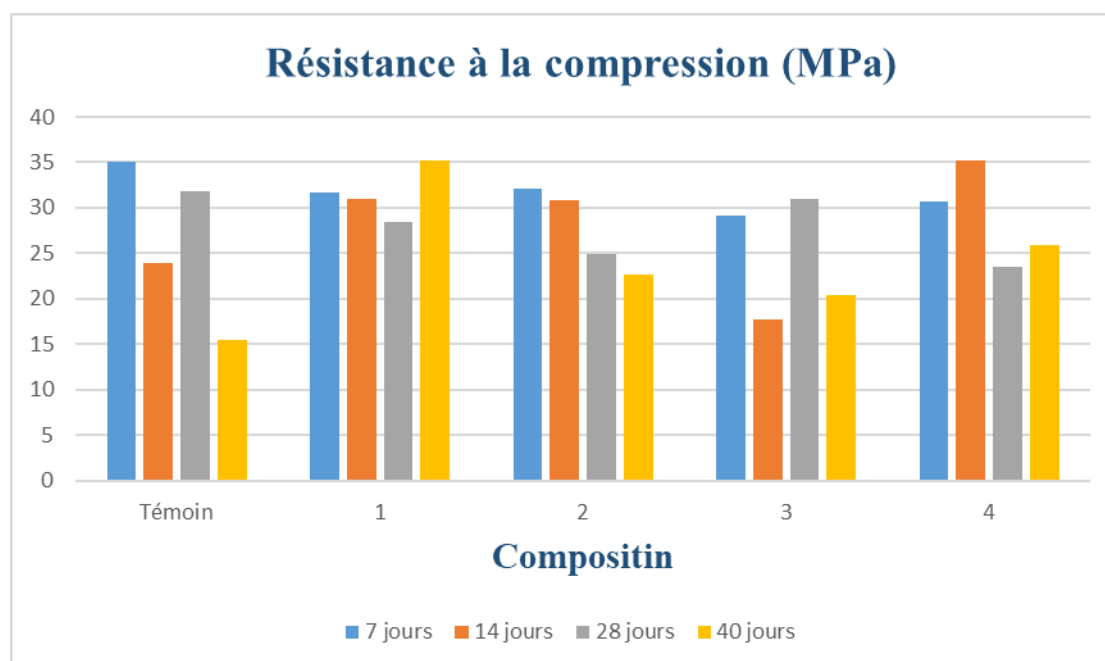


Figure III.8 : La variation de Résistance à la compression.

Commentaire :

Les résultats obtenus pour la résistance à la compression à différents âges (7, 14, 28 et 40 jours) montrent une évolution significative des propriétés mécaniques en fonction de la composition du liant.

À 7 jours, la composition de référence (C0), contenant 100 % de ciment CRS, affiche la résistance à la compression la plus élevée (35,10 MPa). Cette performance est due à une hydratation rapide du clinker, générant une quantité importante de C-S-H primaire et de Ca(OH)_2 , responsables du développement précoce de la résistance.

À 14 jours, la composition C4 (85 % ciment CRS + 15 % pouzzolane naturelle) surpasse les autres formulations (35,15 MPa). Cela peut être attribué à l'activation de la réaction pouzzolanique : la pouzzolane réagit avec le Ca(OH)_2 libéré par l'hydratation du clinker, formant du C-S-H secondaire qui améliore la densité et la cohésion de la matrice cimentaire.

À 28 jours, la résistance maximale revient à la composition de référence (C0) avec 31,87 MPa, bien que la composition C3 (30,91 MPa) en soit proche. À cet âge, la contribution combinée des réactions primaires et secondaires se stabilise.

À 40 jours, c'est la composition C1 (85 % ciment CRS + 15 % laitier) qui se démarque nettement avec une résistance à la compression de 35,23 MPa. Le laitier, à travers une activation lente et progressive en milieu alcalin, génère du C-S-H supplémentaire à long terme. Cette réaction secondaire contribue à la réduction de la porosité capillaire et à l'amélioration continue de la microstructure.

III.3.2.2.2) La résistance à la Flexion:

Tableau III. 9 : La variation de la résistance à la flexion des éprouvettes réservées sous l'eau.

Composition	Résistance à la flexion (MPa)			
	7 jours	14 jours	28 jours	40 jours
Témoin	6.140	6.635	7.261	7.701
1	6.160	5.706	7.850	8.204
2	5.450	6.0485	7.170	7.860
3	6.375	5.363	6.921	7.320
4	5.414	6.177	7.28	7.910

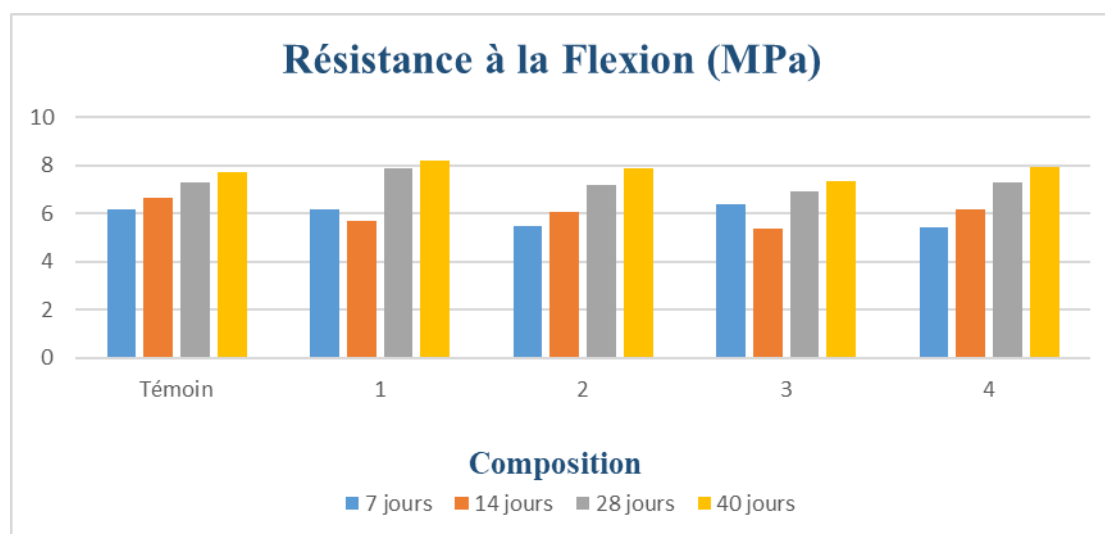


Figure III.9 : La variation de la résistance à la flexion des éprouvettes

Commentaire :

Les valeurs de résistance à la flexion révèlent également des tendances intéressantes quant à l'influence des ajouts minéraux.

À 7 jours, la composition C3 (85 % ciment + 10 % pouzzolane + 5 % laitier) présente la meilleure résistance à la flexion (6,375 MPa), suivie de près par C1 et C0. Ce résultat peut être lié à une synergie entre le début de la réaction pouzzolanique et les effets physiques de remplissage des ajouts fins, qui améliorent l'homogénéité de la pâte.

À 14 jours, la composition C4 atteint une performance supérieure (6,177 MPa), indiquant une intensification de la réaction pouzzolanique, avec un renforcement progressif de la matrice par formation de gels C-S-H supplémentaires.

À 28 jours, la composition C1 enregistre la valeur la plus élevée (7,850 MPa), ce qui suggère que le laitier joue un rôle important dans l'amélioration de la ductilité et la résistance à la traction indirecte, par la densification de la zone interfaciale pâte/agrégat.

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que la résistance à la flexion est particulièrement influencée par les effets combinés de la microstructure de la pâte et des réactions secondaires, qui favorisent l'adhésion et limitent les microfissures.

III.4) Analyse des formulations idéales en fonction de la résistance à la Compression et à la Flexion:

Formulation idéale : C1 (85 % Ciment CRS + 15 % Laitier de haut fourneau)

Justifications du choix :

✓ Performance équilibrée à court, moyen et long terme :

Cette formulation a montré une résistance à la compression élevée à 40 jours (35,23 MPa), la plus élevée parmi toutes les formulations.

Elle a enregistré la plus haute résistance à la flexion à 28 jours (7,850 MPa), ce qui témoigne de la rigidité et de la durabilité de la matrice.

✓ Amélioration de la microstructure :

La présence du laitier a favorisé la formation des composés C-S-H à long terme, réduit la porosité et amélioré la liaison entre la pâte et les granulats.

Le laitier possède des propriétés pouzzolaniques latentes (hydraulicité retardée), qui réagissent progressivement dans le milieu alcalin du ciment, améliorant ainsi les propriétés mécaniques sans nuire au temps de prise initial.

✓ Équilibre optimal entre activité précoce et réactions différées :

La teneur en laitier (15 %) n'a pas affecté de manière significative la prise précoce, maintenant ainsi une bonne résistance durant les premiers jours.

Elle a contribué à renforcer la résistance avec le temps, contrairement aux formulations à haute teneur en pouzzolane qui montrent un retard dans l'évolution de leur résistance.

Finalement ; la formulation C1 est considérée comme le meilleur choix en termes de performance mécanique globale, grâce à son équilibre entre résistance à la compression et à la flexion, ainsi que son bon comportement à long terme, ce qui en

fait une composition adaptée aux applications nécessitant durabilité et résistance prolongée.

III.5) Conclusion:

L'analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus au cours de cette étude a permis d'évaluer l'influence de l'ajout du laitier de haut fourneau et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques et physiques du ciment résistant aux sulfates (CRS), à court, moyen et long terme.

D'une part, les résultats de résistance à la compression ont révélé une nette amélioration pour le mélange C1 (85 % Ciment CRS + 15 % Laitier), notamment à 40 jours, avec une valeur maximale atteignant 35,23 MPa, dépassant même celle du témoin. Cette performance est attribuée à l'effet latent hydraulique du laitier, qui favorise la formation progressive des produits de l'hydratation (C-S-H) à long terme, renforçant la compacité et la durabilité de la matrice cimentaire.

D'autre part, les essais de résistance à la flexion ont confirmé la supériorité du même mélange (C1), notamment à 28 jours avec une valeur de 7,85 MPa, soulignant sa capacité à développer une microstructure solide et homogène.

En ce qui concerne l'absorption et la maniabilité, les compositions contenant du laitier ont montré un bon compromis entre ouvrabilité et compacité, tandis que l'ajout excessif de pouzzolane a légèrement retardé le gain de résistance, en particulier à court terme.

Ainsi, à travers cette étude, il a été clairement démontré que le mélange C1 représente la formulation optimale, combinant à la fois une bonne performance mécanique à tous les âges, une durabilité accrue, ainsi qu'une réactivité progressive bénéfique à long terme.

Conclusion Générale

Conclusion

Conclusion Générale :

Ce travail de recherche s'est inscrit dans le cadre de l'étude de l'effet de l'incorporation d'ajouts minéraux, à savoir le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle, sur les propriétés mécaniques des mortiers à base de ciment résistant aux sulfates (CRS), à court, moyen et longs termes.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence notable de ces ajouts sur le développement des résistances à la compression et à la flexion. Il a été observé que, bien que certains ajouts puissent ralentir le développement initial des résistances, ils favorisent, en revanche, une amélioration progressive des performances mécaniques au fil du temps, grâce à des réactions pouzzolaniques et hydrauliques secondaires qui densifient la microstructure du mortier.

Parmi les différentes formulations testées, la composition C1 (85 % Ciment CRS + 15 % Laitier) s'est révélée être la plus performante globalement, affichant la meilleure résistance à la compression à 40 jours, tout en conservant un bon équilibre de résistance à la flexion. Ce résultat confirme l'intérêt de l'utilisation du laitier comme ajout minéral dans les mortiers, notamment pour des applications à long terme où la durabilité et la performance mécanique sont des critères essentiels.

L'intégration de la pouzzolane naturelle, bien que moins efficace à court terme, a montré un potentiel intéressant à moyen terme, ce qui suggère que son usage peut être optimisé dans des formulations combinées ou pour des usages spécifiques.

Cette étude ouvre ainsi des perspectives pour des recherches futures portant sur :
L'optimisation des proportions combinées d'ajouts minéraux ;

L'étude de la durabilité en environnement agressif ;

Et l'analyse des performances au-delà de 40 jours.

En définitive, l'usage raisonné et scientifique des ajouts minéraux dans les liants hydrauliques constitue une voie prometteuse vers la durabilité, la valorisation des sous-produits industriels et l'amélioration continue des matériaux de construction modernes.

Référence

Références

[1] **YAHIA Mohamed**, « Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.

[2] Zied benghazi ; (L'effet des additions minérales sur les propriétés du ciment au laitier activé) ; Mémoire de magister ; 2008.

[3]<https://www.memoireonline.com/02/13/7021/Etude-physicochimique-du-ciment.html>

[4] MOUMENE SARA ATHAMNIA GHANIA ; (CIMENT ET CIMENTERIES EN ALGERIE : PRODUCTION ET NORMALISATION) ; mémoire de master ; l'Université de Guelma ; Juin 2013

[5] **Djebbari Oussama Charaf Eddine** ; (Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker) ; MÉMOIRE DE MASTER Université Mohamed Khider de Biskra 2020.

[6] Le Neuvau Gide de béton.

[7] **Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete**, 5° éd. Pearson Education, p. 299.

[8] **Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**, 4° éd. McGraw-Hill, chap. 5.

[19] [3] **NF EN 197-1:2011. Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité.**

[10] **CEMBUREAU (2020). Cement Types and Applications**, p. 3.

[11] <https://renoverpourgagner.com/reparer-mouvements-de-fondations/>

[12] [Ouvrages+hydrauliques+&sca_esv=255bbd3e2019d6ad&udm=2&biw=1280&bih=689&sxsrf=AHTn8zrLkj8-txBtGBJd8Qs](https://www.researchgate.net/publication/354111111/Ouvrages+hydrauliques+&sca_esv=255bbd3e2019d6ad&udm=2&biw=1280&bih=689&sxsrf=AHTn8zrLkj8-txBtGBJd8Qs)

[13] **Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2014), op. Cit.**

Références

[14] **Neville, A. M. (2011), op. Cit.**

[15] IDIR Melinda ; ZADRI Hanane ; (Activation du Laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons) ; Mémoire de master : Université Abderrahmane MIRA-Bejaia ; 2021-2022.

[16] **Djebbari Oussama Charaf Eddine ;** (Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker) ; MÉMOIRE DE MASTER Université Mohamed Khider de Biskra 2020.

[17] **BELHOCINE AIDA NAGOUDI NADJAT ;**(Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux) ; Mémoire master ; Université KASDI Merbah – Ouargla ; 06/2014

[18] **BENIA Mounir ;**(Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux) ; mémoire Magister UNIVERSITE * MOHAMED BOUDIAF * DE M'SILA

[19] **SALHI KAMEL ;**(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 ; 03 juillet 2007

[20] Zouai Khadîdja ;(Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières- Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement) ; Mémoire de Magister Université Hassiba Benbouali de Chlef 2011.

[21] Benkaddour, M., Aoual, F.K., & Semcha, A. (2009). Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle.

[22] IDIR Melinda ; ZADRI Hanane ; (Activation du Laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons) ; Mémoire de master : Université Abderrahmane MIRA-Bejaia ; 2021-2022.

[23] «Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière ; Guide laitiers de hauts fourneaux »

[24] **Ahmed HADJ SADOK ;**(Comportement des mortiers et bétons à base

Références

De ciments au laitier d'el hadjar dans des milieux agressifs) ; Thèse de Doctorat ; Université Saad Dahlab de Blida ; 2010

[25] Escalante-García, J.I., & Sharp, J.H. (2001). The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 57–72. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00065-0)

[26] Chen, W., & Brouwers, H.J.H. (2010). The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. *Journal of Materials Science*, 45, 660–673. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-4007-1>

[27] Tagnit-Hamou, A., Petrov, N., & Sorelli, L. (2011). High-performance concrete incorporating slag cement and metakaolin: Strength and durability properties. *ACI Materials Journal*, 108(2), 132–139.

[28] Taylor, H.F.W. (1997). *Cement Chemistry* (2e éd.). Thomas Telford Publishing.

[39] Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Vázquez, T., et al. (2000). Alkali-activated slag cement strength behavior and hydration products. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1625–1632. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2)

[40] **ASTMC 618-94** « Cool fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete » **ASTM Standard**, 3 pages.

[41] **A. K. Ramezaniapour**, (Engineering properties and morphology of pouzzolanic cementconcrete), PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987.

[42] <https://www.bpn45.com/general-6-25>

[43] **GUEMMOUDA Khaoula; ZOUZOU Lina** ;(Contribution à l'étude de comportement de mortier à base des additions minérales) ; Mémoire master ; UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGULA ; 2018/2019. (Pouzzolane naturelle)

[44] **BELHOCINE AIDA ; NAGOUDI NADJAT** ; (Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux) ; Mémoire master ; Université KASDI Merbah – Ouargla 2014

Références

[45] BELBACHIR NASRINE ;(Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse) ; Mémoire de magister ; UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM ; 2012.(hydratation , le comportement de pouzzolane)

[46] M. Bourouina et al. "Performance mécanique du béton contenant de la pouzzolane naturelle", *Advances in Civil Engineering*, (2024).
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/3356641>

[47] H. Mohsen et al., "Natural pozzolana for sustainable concrete: Effects on mechanical and durability properties", *Buildings*, MDPI, (2023).
<https://www.mdpi.com/2075-5309/13/8/1927>

[48] A. Benzerzour et al., "High performance concrete incorporating high volumes of natural pozzolana: A life cycle assessment approach", *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, (2023).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223002668>

[49] I. Khmiri, "Sustainable natural pozzolana concrete: A comparative study on its environmental performance", *ResearchGate*, (2020).
<https://www.researchgate.net/publication/345661800>

[50] Baudet, J.C. (2003). *Le béton et ses constituants*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 109-120.

[51] *Le nouveau Guide de béton*.

[52] <https://www.google.com/search?vsrid=CMObqbTuse3dmQEQAhgBliQzOGZjOTlmOC0wMDFjLTQ2OTQtODM5NC1iZGE0MzhiOGM2ZWY4rZHq8Z6mjQM&vsint>

[53] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/construction-maison-preparer-bon-mortier-hourdage-1023/page/4/>

<https://www.google.com/search?vsrid=CIiAsci2mqmIIRACGAeiJDZkOGM1MTIyLTU1MTItNDdhNS04MWM3LWNhNTBmZGU1ZmNlNjiync-jmKaNAw&vsint>

[54] <https://www.google.com/search?vsrid>

Références

[55]<https://www.google.com/search?vsrid=CM6frcLm4ZiwowEQAhgBliQyMTc wNzJiMi1iNzkzLTQ2> <https://www.platipro.com/mortier-platre/>

Les normes

Analyse granulométrique [EN 933-1]

Le module de finesse du Sable M_f selon la norme (NA EN 12620):

La masse volumique apparente

La masse volumique absolue $\rho(g/cm^3)$:

Porosités ;

Compacité

L'indice des vides

L'équivalent de sable [NFP 18-597, EN 933-8]

Essai de Consistance de la pâte de ciment EN 196-3

Essai de prise de la pâte de ciment EN 196-3

Confection des éprouvettes et condition de conservation (NF EN 196-1)

Essai de la vitesse des impulsions ultrasonores (UPV) – Vitesse de propagation du son selon la norme (NF EN 12504-4):

Essai d'absorption totale d'eau selon la norme NF P (18-459):

Essais de résistance à la flexion et à la compression (selon la norme NF EN 196-1)