

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par :

SELLAOUI CHARAF EDDINE

**Thème : Etude comparative des propriétés rhéologiques
des pâtes de ciments**

Sous la direction de : **Dr. Nigri Ghania**

Juin 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumés.....i-iii

Sommaire.....S1-S4

Liste des tableaux.....S5-S6

Liste des figures.....S7-S9

	Page
Introduction générale	1-2
Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation des déchets	
Partie 01 : Généralités sur les ciments	
1.1. Introduction	3
1.2. Définition d'un ciment	3
1.3. Composition du ciment	4
1.3.1. Clinker portland (K)	4
1.3.2. Fumée de silice (D)	5
1.3.3. Laitier de haut fourneau (S)	6
1.3.4. Cendres volantes (C).....	6
1.3.5. Sulfate de calcium.....	6
1.3.6. Fillers (F)	7
1.3.7. Calcaire (L)	7
1.3.8. Schistes calcinés (T)	8
1.3.9. Constituants mineurs du ciment.....	8
1.4. Principaux procédés et méthodes de fabrication de ciment	10
1.4.1. En voie sèche	10
1.4.2. En voie semi-sèche	10
1.4.3. En voie semi-humide	10
1.4.4. En voie humide.	11
1.5. Les étapes de fabrication du ciment	12
1.5.1. Extraction des matières premières	12
1.5.2. Stockage et broyage des matières premières	12
1.5.3. Cuisson pour obtention du clinker	12
1.5.4. Broyage du clinker pour obtenir le ciment	13
1.6. Différents types et classification des ciments	14
1.6.1. En fonction de leur composition	14
1.6.2. En fonction de leur résistance normale.....	15

1.7. Utilisation des différents types de ciments	16
1.7.1. Le ciment portland CEM I	16
1.7.2. Le ciment portland composé CEM II	16
1.7.3. Le ciment des hauts-fourneaux CEM III	16
1.7.4. Le ciment pouzzolanique CEM IV	16
1.7.5. Le ciment au laitier et aux cendres CEM V	16
1.8. Autres types de ciments	16
1.8.1 Ciments résistants aux sulfates : (C.R. S)	16
1.8.2. Ciments blancs	16
1.8.3. Ciments colorés	17
1.8.4. Ciments alumineux	17
1.8.5. Ciment à maçonner	17
1.9. Hydratation du ciment	17
1.9.1. L'hydratation des composants du ciment	17
1.9.1.1. Hydratation des silicates C_3S et C_2S	17
1.9.1.2. L'hydratation des aluminates C_3A	19
1.9.2. Évolution de l'hydratation	22

Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation des déchets

Partie 02 : Valorisation de déchet dans le domaine du génie civil

1.10. Introduction	24
1.11. Définition des déchets	24
1.12. Classification des déchets	24
1.13. Gestion des déchets	25
1.14. Valorisation du verre dans le domaine de génie civil	26
1.14.1. Définition de verre	26
1.14.2. Structure du verre.....	26
1.14.2.1. Composition chimique du verre	26
1.14.2.2. Structure vitreuse du verre	27
1.14.3. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment....	28
1.14.3.1. Réaction alcali-silice du verre	28
1.14.3.2. Rôle des pouzzolanes dans la réduction des expansions dues à la réaction alcali-silice (ciment -verre)	29
1.14.3.3. Réaction pouzzolanique (ciment-verre)	30
1.14.3.4. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique	30
1.14.4. Bénéfices et performance de l'intégration de la poudre de verre comme ajout cimentaire	32
1.15. Valorisation du déchet de brique dans le domaine de génie civil	32
1.15.1. Brique de terre cuite	32
1.15.2. Fabrication des produits de terre cuite	32
1.15.3. Utilisation de la poudre de brique comme substituant du ciment..	34
1.15.4. Composition chimique de la poudre de brique	35
1.15.5. Activité pouzzolanique	35

1.15.6. Bilan de la valorisation des briques	36
1.16. Valorisation du laitier de haut fourneau dans le domaine de génie civil ...	37
1.16.1. Laitiers de hauts fourneaux	37
1.16.2. Composition chimique du laitier	37
1.16.3. Composition minéralogique du laitier	38
1.16.4. Valorisation du laitier dans l'industrie cimentaire	38
1.16.5. Caractéristiques du laitier destiné à la fabrication du ciment	39
1.16.6. Caractéristiques des ciments contenant le laitier	40
1.16.6.1. Évolution de la résistance dans le temps	40
1.16.6.2. Effet de la chaleur d'hydratation	41
1.16.6.3. Résistance aux agressions chimiques	41
1.16.7. Méthodes d'activation du ciment au laitier	41
1.16.7.1. Activation thermique	42
1.16.7.2. Activation mécanique	42
1.16.7.3. Activation chimique	42
1.17. Conclusion	43

Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales

2.1. Introduction	44
2.2. Préparation des nouveaux ciments	44
2.3. Essais effectués	46
2.3.1. Préparation des mortiers normalisés	46
2.3.2. Essais de caractérisation chimique	48
2.3.2.1. Composition chimiques par fluorescence X	48
2.3.2.2. Perte au feu (PAF)	49
2.3.2.3. Teneur en (CaO) libre	50
2.3.3. Essais de caractérisations physiques	51
2.3.3.1. Masse volumique absolue des ciments anhydre	51
2.3.3.2. Masse volumique apparente des ciments anhydres	51
2.3.3.3. Mesure de la surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments	52
2.3.3.4. Essai de consistance normale des ciments	53
2.3.3.5. Essai de prise	54
2.3.3.6. Essai sur mortier normalisé	55
A. Masse volumique apparente des mortiers à l'état frais	55
B. Tests d'étalement	56
C. Absorption d'eau par immersion totale	57
D. Essai de porosité accessible à l'eau	58
E. Etude de la porosité accessible à l'eau (ébullition ASTM C642)	59
F. Essai d'absorption d'eau par capillarité	60
G. Essai d'ultrasons	62
2.3.4. Essais de caractérisations mécaniques	63
2.4. Conclusion	64

Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

3.1. Introduction	65
3.2. Résultats des essais réalisés	65

3.2.1. Composition chimique des déchets	65
3.2.2. Caractérisation des ciments élaborés.....	66
3.2.2.1. Caractérisation chimique	67
A) Composition chimique des ciments élaborée	67
A.1) Par fluorescence X	67
A.2) Teneur en (CaO) libre et en perte au feu (PAF)	68
B) Indices d'hydrauliques	68
3.2.2.2. Caractérisation physique	69
A) Masses volumiques des ciments.....	69
B) Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés	69
C) Essai de consistance normale des ciments.....	70
D) Temps de prise.....	70
E) Essai sur mortier normalisé	71
E.1) Masse volumique apparente des mortiers à l'état frais	71
E.2) Tests d'étalement	72
E.3) Absorption d'eau par immersion totale.....	74
E.4) Porosité accessible à l'eau	75
E.5) Absorption capillaire.....	75
E.6) Vitesses ultrasoniques	77
3.2.2.3. Caractérisation mécanique	77
A) Résistance mécanique à la compression.....	78
B) Résistance mécanique à la flexion	78
3.3. Conclusion	79
Conclusions générales	80
Références bibliographiques	82

Remerciements

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, qui nous a appris ce que nous l'ignorions, de nous avoir donné la santé et tout ce dont nous avons besoin pour réaliser le travail demandé et rédiger ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent A : Madame Nigri Ghania, docteur à l'Université de Guelma, ma directrice de mémoire d'avoir accepté mon encadrement, pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ce travail, pour son soutien et son aide à la recherche des solutions adaptées aux difficultés que nous avons rencontré au cours de la réalisation de ce mémoire, mais aussi et surtout pour sa qualité humaine.

Je remercie l'ensemble du corps des enseignants et administratifs et surtout les techniciennes du laboratoire : Mme Samira Kannat et Mme Siham Mahboubi du département de génie civil et d'hydraulique, faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 mai 1945 de Guelma.

Mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de la cimenterie de Hadjar-soud, qui ont contribué à la réalisation de ce travail durant la période de mon stage.

Enfin, Mes remerciements les plus profonds à ma chère famille pour leur soutien moral indéfectible et leur encouragements.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma chère maman, je demande à Dieu d'avoir pitié d'elle, pour
qui et grâce à elle, j'ai atteint ce que je suis.*

*A mon père qui m'a soutenu tout au long de mes études par sa patience et ses
conseils.*

A mes sœurs dont j'ai toujours reçu le soutien moral.

A la chère ROKAYA et au petit AYAN.

A ma tante et ses enfants.

*A l'honorable professeur NIGRI GHANIA pour la bonté de son cœur et ses bonnes
manières.*

A toute la famille.

Merci à tous...

LISTE DES TABLEAUX

Réf tableau	Titre	Page
Tableau 1.1	Composition en oxyde du clinker.	4
Tableau 1.2	Phases anhydres du clinker.	5
Tableau 1.3	Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.	14
Tableau 1.4	Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.	15
Tableau 1.5	Classification des déchets en Polynésie française 2018.	25
Tableau 1.6	Composition chimique du verre.	27
Tableau 1.7	Composition chimique des déchets de briques.	35
Tableau 1.8	Variation de la composition chimique du laitier.	38
Tableau 2.1	Désignation et dosage des ciments élaborés.	45
Tableau 2.2	Malaxage d'un mortier normal.	48
Tableau 2.3	Compositions chimiques des matériaux utilisées.	49
Tableau 2.4	Valeurs d'étalement NF EN 1015-3.	57
Tableau 2.5	Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion.	63
Tableau 3.1	Composition chimique des déchets utilisés.	65
Tableau 3.2	Désignation et dosage des ciments élaborés.	67
Tableau 3.3	Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)	67
Tableau 3.4	Teneur En (CaO) libre déterminée par l'alcool glycérol.	68

Tableau 3.5	Indices hydrauliques des ciments élaborés.	68
Tableau 3.6	Masses volumiques des ciments élaborés.	69
Tableau 3.7	Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés.	69
Tableau 3.8	Consistance normale des ciments élaborés.	70
Tableau 3.9	Temps de prise des ciments élaborés.	70
Tableau 3.10	Masse volumique apparente des mortiers normalisés à l'état frais.	72
Tableau 3.11	Test d'étalement des ciments élaborés et des mortiers normalisés.	73
Tableau 3.12	Résultats d'absorption d'eau par immersion totale (28 J).	74
Tableau 3.13	Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés en (%).	75
Tableau 3.14	Absorption capillaire des mortiers de ciments élaborés après 28 jours et 60 jours.	76
Tableau 3.15	Vitesses ultrasoniques des ciments élaborés.	77
Tableau 3.16	Résistance mécanique à la compression et à la flexion des des ciments.	77
Tableau 3.17	Caractéristiques des ciments élaborés.	79

LISTE DES FIGURES

Réf figure	Titre	Page
Figure 1.1	Le clinker.	5
Figure 1.2	Composition du ciment.	9
Figure 1.3	Schéma de la fabrication du ciment.	11
Figure 1.4	Schéma d'appareillage de la fabrication du ciment.	13
Figure 1.5	Ca(OH) ₂ et CSH.	18
Figure 1.6	Cristaux de portlandite.	18
Figure 1.7	Organigramme de mécanisme d'hydratation du C ₃ S.	19
Figure 1.8	Aiguilles d'ettringite.	20
Figure 1.9	Monosulfoaluminate hydraté.	20
Figure 1.10	Degré d'hydratation des phases C ₃ S, C ₂ S, C ₄ AF et C ₃ A en fonction du temps.	21
Figure 1.11	Comparaison de la résistance a la compression des phases du ciment en cours d'hydratation.	21
Figure 1.12	Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment d'après bensted.	23
Figure 1.13	Diffractogramme des rayons «x» du verre (laboratoire des matériaux cimentaires alternatifs, université de Sherbrooke).	27
Figure 1.14	Transformation de déchets de verre en poudre de verre.	28
Figure 1.15	Expansion due à la RAG (réaction alcali-granulats) sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (shayan et al, 2004).	29
Figure 1.16	Expansion due à la RAG a 23°C (shi et al, 2005).	30

Figure 1.17	Activité pouzzolanique de la poudre de verre (shi et al, 2005).	31
Figure 1.18	Fabrication des produits de terre cuite.	33
Figure 1.19	Poudre de brique rouge utilisé.	34
Figure 1.20	Diagramme de keil avec ajout du matériau brique.	36
Figure 1.21	Schéma de principe d'un haut fourneau.	37
Figure 1.22	Evolution de la résistance a la compression r_c de deux ciments en fonction du temps t .	40
Figure 1.23	Elévation de la température au moment de la prise du ciment.	41
Figure 2.1	Matériaux utilisés.	45
Figure 2.2	Broyage des déchets.	46
Figure 2.3	Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé.	47
Figure 2.4	Sachets de sable normalisé.	47
Figure 2.5	Spectromètre à Fluorescence X.	49
Figure 2.6	Four de calcination pour PAF.	50
Figure 2.7	Essai de la teneur en CaO libre.	50
Figure 2.8	Masse volumique absolue des ciments.	51
Figure 2.9	Masse volumique apparente des ciments anhydre.	52
Figure 2.10	Appareil de Blaine (SSB).	53
Figure 2.11	appareil de Vicat.	54
Figure 2.12	Prisomètre (Vicat automatique).	54
Figure 2.13	Masse volumique apparente à l'état frais du mortier.	55
Figure 2.14	Tests d'étalement.	56

Figure 2.15	Etuve utilisée - Conservation des éprouvettes a l'eau potable.	58
Figure 2.16	Balance hydrostatique.	59
Figure 2.17	Etude de la porosité accessible à l'eau selon la norme Américaine ASTM C642.	60
Figure 2.18	Schéma du dispositif expérimental de capillarite.	61
Figure 2.19	Essai d'absorption d'eau par capillarite.	62
Figure 2.20	Appareil à ultrasons utilisé.	62
Figure 2.21	Appareil flexion-compression.	63
Figure 3.1	Résultats de temps de prise des ciments élaborés.	71
Figure 3.2	Masses volumiques des mortiers de ciments préparés à l'état frais.	72
Figure 3.3	Résultats de test d'étalement des mortiers normalisés de ciments élaborés.	73
Figure 3.4	Résultats d'absorption d'eau par immersion totale (28 J).	74
Figure 3.5	Résultat de la Résistance mécanique à la compression à 28 et 60 jours.	78

RESUMES

Résumé

Dans ce travail de recherche, on vise à étudier la faisabilité de fabriquer un nouveau ciment composé ou une partie de clinker est substituée par la poudre issue de broyage des déchets de verre, de brique et de laitier de haut fourneau. Le taux de substitution a été fixé à 20% de la somme des trois déchets. Après la préparation des échantillons, on a procédé aux essais de caractérisation selon les normes en vigueur à savoir la caractérisation chimique, physique et mécanique.

L'étude rhéologique des nouveaux ciments est limitée par la disponibilité des essais. Sur pate pure de ciment, on a réalisé l'essai de consistance, les temps de prise (début et de fin de prise) tandis que le test d'étalement, et la mesure de la masse volumique apparente à l'état frais sont effectués sur des mortiers normalisés confectionnés à base des ciments préparés.

Les résultats trouvés montrent que les nouveaux ciments présentent des masses volumiques inférieures à celle du ciment de référence (0%) ajout. La plupart des nouveaux ciments ont enregistré des temps de début de prise très proches mais des temps de fin de prise variable. Ces derniers sont largement influencés par le type d'ajout dominant : la poudre de brique contribue à l'accélération du temps de prise et absorbe une quantité plus importante d'eau de gâchage que la poudre de laitier et du verre.

A l'état durci, les mortiers préparés à base des nouveaux ciments se caractérisent par une structure plus dense que celle de l'échantillon de référence, ce qui influe directement sur les différentes performances du matériau. Les poudres des déchets choisis contribuent de manière différente en termes d'activité pouzzolanique ce qui rend l'interprétation des résultats difficile. Finalement, on propose la composition suivante : 75% du clinker, 5% de brique, 7.5% de laitier, 7.5% de verre et 5% de gypse.

Cependant, il convient de noter qu'une étude approfondie de microstructure est nécessaire pour mieux comprendre le comportement de ces ajouts au sein de la matrice cimentaire.

Mots clés : Ciment, Propriétés rhéologiques, Laitier de haut fourneau, Déchet de brique, Déchet de verre, Valorisation.

ملخص

هذا العمل البحثي، يهدف إلى دراسة جدوى تصنيع أسمنت مركب جديد حيث يتم استبدال جزء من الكلنكر بالمسحوق الناتج عن طحن نفايات الزجاج والطوب وخبث الفرن العالي. تم تحديد معدل الاستبدال بنسبة 20% من مجموع النفايات الثلاثة. بعد تحضير العينات، انتقلنا إلى اختبارات التوصيف وفقاً للمعايير المعمول بها للحصول على الخصائص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية.

الدراسة الريولوجية للأسمنت الجديد محدودة بتوفر وسائل التجارب. على عينة الأسمنت، أجرينا اختبار الاتساق، قياس أزمنه تماسك العجينة (بداية ونهاية التماسك)، اختبار الانتشار، وقياس الكثافة الظاهرية في حالة الطراوة على ملاط مصنوع من الأسمنت المحضر.

اظهرت النتائج أن الأسمنت الجديد يحتوي على كتلة حجمية أقل من الأسمنت المرجعي (0%). سجلت معظم أنواع الأسمنت الجديدة أوقات بداية التماسك متقاربة للغاية ولكن أوقات نهائية التماسك متغيرة. تتأثر هذه إلى حد كبير بالنوع السائد للإضافة: يساهم مسحوق الطوب في تسريع زمن التماسك ويمتص كمية أكبر من ماء الخلط مقارنة بالخبث ومسحوق الزجاج.

في الحالة الصلبة، يتميز الملاط المحضر من الأسمنت الجديد ببنية أكثر كثافة من تلك الموجودة في العينة المرجعية، مما يؤثر بشكل مباشر على بقية الخائص. تساهم مساحيق النفايات المختارة بشكل مختلف من حيث النشاط البوزولاني، مما يجعل تفسير النتائج صعباً.

أخيراً، تم اقتراح التركيبة التالية: 75% كلنكر، 5% طوب، 7.5% خبث، 7.5% زجاج و5% جبس.

ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن الدراسة المعمقة لبقية الخصائص الأخرى بالإضافة إلى الفحص المجهرى ضروريين لفهم سلوك هذه الإضافات بشكل أفضل داخل مصفوفة الاسمنت.

الكلمات المفتاحية: الأسمنت، الخصائص الريولوجية، خبث الفرن العالي، بقايا الطوب، بقايا الزجاج، الاسترداد.

Abstract

In this research work, we aim to study the feasibility of manufacturing a new composite cement where part of the clinker is substituted by the powder resulting from the grinding of waste glass, brick and blast furnace slag. The substitution rate was set at 20% of the sum of the three wastes. After the preparation of the samples, we proceeded to the characterization tests according to the standards in force to have the chemical, physical and mechanical characterization.

The rheological study of new cements is limited by the availability of tests. On pure cement paste, we carried out the consistency test, the setting times (beginning and end of setting) while the spreading test, and the measurement of the apparent density in the fresh state are carried out. On standardized mortars made from the prepared cements.

The results found show that new cements have lower densities than the reference cement (0%). Most of the new cements recorded very similar set times but variable end-set times. These are largely influenced by the dominant type of addition: the brick powder contributes to accelerating the setting time and absorbs a greater quantity of mixing water than the slag and the glass powder.

In the hardened state, the mortars prepared from new cements are characterized by a denser structure than that of the reference sample, which directly influences the different performances of the material. The powders of the selected waste contribute differently in terms of pozzolanic activity, which makes it difficult to interpret the results.

Finally, the following composition is proposed: 75% clinker, 5% brick, 7.5% slag, 7.5% glass and 5% gypsum.

However, it should be noted that a thorough study of the microstructure is necessary to better understand the behavior of these additions within the cementitious matrix.

Keywords: Cement, Rheological properties, Blast furnace slag, Waste bricks, Waste glass, Valorization.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Introduction générale

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploités en profondeur.

L'incorporation des déchets et des sous- produits dans la formulation du béton et la fabrication du ciment présentent plusieurs intérêts techniques, économiques et écologiques.

Certains sous-produits de l'industrie peuvent avoir des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques latents qui les rendent potentiellement utiles comme ajout cimentaire dans la production du béton et la fabrication du ciment.

Dans ce travail de recherche, nous sommes intéressés par l'utilisation de quelques déchets tels que les déchets de verre plat transparent, les déchets de brique et le laitier de haut fourneau. Ces déchets seront finement broyés puis incorporés comme substituants du clinker pour la fabrication des ciments composés CPJ CEM II /A.

Le taux de substitution est fixé à 20% de la somme des trois ajouts. Onze (11) échantillons de ciment sont préparés dont un est considéré comme échantillon de référence (0%) ajout.

Une fois préparés, les nouveaux ciments sont soumis à des essais de caractérisation chimique, physique et mécanique.

Le mémoire est composée en trois chapitres, le premier chapitre est une analyse de la bibliographie qui sera présentée en deux parties : la première est consacrée à l'industrie du produit ciment (composition, classification, normes, fabrication et hydratation), la deuxième partie est consacrée à une synthèse dans laquelle, on expose les résultats des travaux de recherches qui traitent la valorisation du déchet du verre, brique et du laitier dans la fabrication du ciment.

Dans le deuxième chapitre, la procédure expérimentale utilisée (Préparation des échantillons et le mode opératoire suivi pour la caractérisation de produit final) sera détaillée.

Introduction Générale

Dans le troisième chapitre, nous exposons l'ensemble des résultats des essais de caractérisation réalisés à savoir la caractérisation chimique, physique et mécanique. Ces résultats seront également discutés et comparés avec ceux de l'échantillon de référence.

Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats trouvés et les principaux axes décrivant une future étude expérimentale.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES CIMENTS ET LA VALORISATION DU DECHET

PARTIE 01

GENERALITES SUR LES CIMENTS

CHAPITRE 1

Généralités sur les ciments et la valorisation des déchets

Partie 01 : Généralités sur les ciments

1.1. INTRODUCTION

Le ciment est un matériau de base dans les secteurs du bâtiment et du génie civil. Il est utilisé dans la fabrication du béton, qui est le deuxième matériau le plus utilisé sur la planète. C'est un matériau de construction durable, versatile et totalement recyclable.

Le ciment est fabriqué dans plus de 150 pays dans des centaines d'usines locales. Sa production progresse régulièrement depuis le début des années cinquante. Elle ne cesse d'augmenter dans les pays en voie de développement en particulier en Asie qui constitue le grand producteur de ciment pendant la dernière décennie.

Cette augmentation de productivité est due à l'utilisation de la technologie (unités de production de plus en plus grandes, la mise en œuvre de la conduite automatique des procédés) et à l'utilisation d'un personnel moins nombreux mais plus qualifié requis par cette automatisation [1].

Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique dans laquelle, on présente les techniques et les procédés dont sont issues les ciments, après avoir connaître les matières utilisées pour la fabrication de ce liant hydraulique.

1.2. DEFINITION D'UN CIMENT

Selon La Rousse [Larousse., 2017], un ciment est « une matière pulvérulente formant avec l'eau, ou une solution saline, une pâte plastique liante, susceptible d'agglomérer, en durcissant, des substances variées ».

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire que mélangé à l'eau il forme une pâte qui fait prise et durcit (propriétés hydrauliques). Il est utilisé sous forme de poudre pour confectionner du béton ou du mortier.

Les ciments courants sont élaborés à partir d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, mélange qui est progressivement chauffé à une température voisine de 1450°C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces opérations, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques.

Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse et éventuellement avec d'autres produits, puis finement broyé, donne le ciment [2].

1.3. COMPOSITION DU CIMENT

Le ciment résulte du broyage et de l'homogénéisation des composants suivants :

1.3.1. Clinker portland (k)

Le clinker Portland est le constituant principal hydraulique des ciments courants, il est obtenu par calcination (1450°C) d'un mélange de matières premières, composé d'environ 80 % de calcaire et 20 % d'argile [3]. Le clinker portland se présente sous forme de nodules durs composés de chaux CaO, de silice SiO₂, d'alumine Al₂O₃ et de ferrite Fe₂O₃.

Le clinker formulé doit répondre à certains critères de composition chimique qui sont reportés dans le tableau 1.1 [4].

Dans la fabrication du ciment, une bonne préparation (mélange) est calculée pour avoir un rapport (rapport de saturation en chaux) m proche de 1.

$$m = \text{CaO} / (2.8 \text{ SiO}_2 + 1.18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3) \text{ [5].}$$

Si m=1 toute la chaux est consommée.

L'art du cimentier consiste à se rapprocher au maximum de cette valeur, Mais en réalité on prend une quantité de quelques pour cents inférieures à ces valeurs.

Tableau 1.1 : Composition en oxyde du clinker.

Oxydes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃
Teneur limite (%)	60÷69	18÷24	4÷8	1÷8	< 5	< 2	< 3

L'association de ces oxydes par cuisson à une température de 1450°C dans le four donne la formation des quatre phases anhydres, phases présentées dans le tableau suivant [4] :

Tableau 1.2 : Phases anhydres du clinker.

Phases minéralogiques	Formule	Notation simplifiée	%
Silicate tricalcique	3CaOSiO_2	C_3S	50 à 75
Silicate bi calcique	2CaOSiO_2	C_2S	10 à 30
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	2 à 15
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 à 15

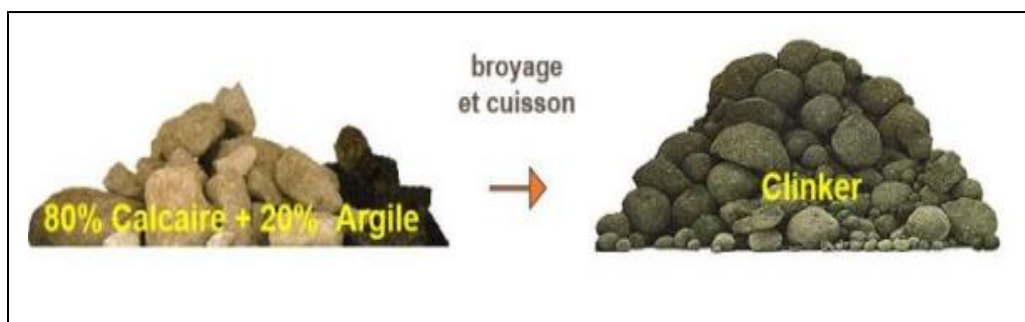


Figure 1.1 : Le clinker.

1.3.2. Fumée de silice (D)

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferro silicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2000 °C.

La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO , intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation [6]. L'ajout de fumée de silice en remplacement partiel du ciment se traduit par un accroissement de la résistance en compression par rapport à un béton de référence pendant le premier mois d'hydratation. A plus long terme cependant, le gain de résistance tend à s'annuler. La fumée de silice joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ avec un effet optimum pour des pourcentages de l'ordre de 10 à 15% quel que soit le rapport eau sur liant (ciment plus fumée de silice) [7].

1.3.3. Laitier de haut fourneau (S)

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé 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. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [8].

1.3.4. Cendres volantes (C)

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles constituent un produit minéral pulvérulent, consécutif du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible en présence ou non de matériaux de co-combustibles. Ces cendres sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières. En cimenterie, les cendres volantes sont utilisées pour la préparation de la matière première (le cru). Elles apportent essentiellement la silice, l'alumine et le fer. Elles peuvent être ajoutées lors du broyage final (avec le clinker, le gypse et les éventuels autres constituants secondaires). Leur passage dans le broyeur augmente le rendement de ce dernier (grâce aux imbrûlés) [9].

1.3.5. Sulfate de calcium (Le gypse – CaSO_4)

Le gypse est une roche sédimentaire dissoute à l'origine dans l'eau de mer. Le sulfate de calcium est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication pour régulariser la prise [10].

Le sulfate de calcium peut se présenter sous forme de :

- Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou sulfate de calcium déshydraté.
- Héli hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).
- Anhydrite (CaSO_4) ou sulfate de calcium anhydre.
- Mélange de ces trois composants

Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leur vitesse de dissolution peut être différente. Il est

composé de 92 à 94% de $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, 2 à 3% de (CaCO_3) , et 2 à 4% d'autres éléments tels que les $(\text{SiO}_2, \text{MgO}, \text{R}_2\text{O})$.

Le pourcentage optimal de gypse croît en fonction :

- de la teneur en alcalis, car l'addition du gypse neutralise l'action des alcalis.
- de la teneur en C_3A et de sa réactivité.
- de la finesse de mouture [4].

Au-dessus de 1450°C , le gypse se décompose en oxyde de calcium (CaO , ou "chaux vive") et en dioxyde de soufre (SO_2) [11].

1.3.6. Fillers (F)

Selon la norme NF EN 12620 [12], les fillers sont des granulats de taille inférieure à 0,063mm. L'utilisation des fillers dans des dosages appropriés dans la formulation des bétons permet d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durcis.

Les fillers peuvent être utilisés soit en substitution partielle du ciment selon le concept de liant équivalent. L'ajout de filler dans une formule béton présente un intérêt triple : économique, technique et environnementale. pour garantir la fluidité des bétons et faciliter leur pompage pour diminuer la porosité finale des bétons donc améliorer leur résistance mécanique, leur durabilité et l'esthétique des parements (diminution de la rugosité de surface et du bullage) qui permet de réduire la quantité de ciment dans le béton donc d'optimiser le bilan carbone du matériau final ainsi que son coût à travers une pureté très élevée, les fillers calcaires permettent de minimiser les dosages en adjuvant susceptibles d'interagir avec les impuretés qui auraient pu être présentes dans le gisement initial. A travers une contribution CO_2 faible, les fillers permettent une diminution globale supérieure de l'empreinte CO_2 des bétons [13].

1.3.7. Calcaire (L)

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée, composée d'au moins 50% de calcite CaCO_3 (ou carbonate de calcium) et pouvant contenir de la dolomite, de l'aragonite. Les calcaires se forment soit par accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires (coraux, bivalves, foraminifères), soit par précipitation chimique ou biochimique de carbonates de calcium.

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excèdent 5% en masse (constituant principal), le calcaire doit satisfaire aux exigences suivantes [4] :

- teneur en calcaire : $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ en masse.
- teneur en argile : Adsorption de bleu de méthylène ≤ 1.20 g/100g.
- teneur en matières organiques : (TOC) $\leq 0.50\%$ en masse.

1.3.8. Schistes calcinés (T)

Sont des schistes produits dans un four à 800°C , ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libre CaO , de sulfates de calcium, ainsi que des oxydes en quantités plus importantes. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques [14].

1.3.9. Constituants mineurs du ciment

Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont : MgO , Na_2O , K_2O et SO_3 . L'oxyde de magnésium (MgO) provient de la dolomite, souvent présente avec le calcaire. Les oxydes alcalins K_2O et Na_2O proviennent en général, de l'argile et des feldspaths. L'anhydride sulfurique (SO_3) dans le clinker provient de la pyrite (FeS_2), du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou de gaz naturel [15].



Poudre de ciment



La fumée de silice



Figure 1.2 : Composition du ciment.

1.4. PRINCIPAUX PROCÉDES ET MÉTHODES DE FABRICATION DE CIMENT

Le procédé de fabrication du ciment portland est un procédé complexe. La production du ciment portland qui répond aux normes de qualité exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, et de contrôles rigoureux et continus de la qualité durant tout le procédé [16].

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide.

1.4.1. En voie sèche

Les roches sont concassées, échantillonnées, déversées dans, des halls de pré-homogénéisation de façon à reconstituer une « carrière artificielle ». Elles sont reprises afin d'être transformées en poudre sèche dans des broyeurs sécheurs puis parfaitement homogénéisées par le procédé de fluidification. La poudre obtenue passe ensuite dans des fours le plus souvent constitués de deux parties : une partie verticale (préchauffer) où elle se décarbonate et arrive ainsi vers 1000° dans un four rotatif court (60 à 80 mètres de longueur). Un four de 4 mètres de diamètre et 70 mètres de longueur a une production de 2500 tonnes/jours. Il existe des fours capables de produire jusqu'à 8000 tonnes de clinker par jour.

Ce procédé est économique et consomme de l'ordre de 800 à 900 kcal/kg de clinker : soit environ 40% de moins que le procédé par humide [17].

1.4.2. En voie semi-sèche

La poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre « Grille LEPOL » puis dans le four [16].

1.4.3. En voie semi-humide

La pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru [16].

1.4.4. En voie humide

Les matériaux sont délayés avec de l'eau de façon à obtenir une pâte fluide (28 à 35% d'eau) ayant une composition chimique convenable et qui sert à alimenter des fours rotatifs. Un four moyen de 150 mètres de longueur, 4 mètres de diamètre permet une production de 1000 tonnes/jours. Les plus grands en service ont des diamètres de 6 à 7 mètres, des longueurs de 230 mètres et peuvent produire près de 4000 tonnes de clinker par jour. Le clinker est refroidi vers 100°C dans des appareils spéciaux et stocké dans des halls.

C'est le procédé le plus ancien mais il n'est pas économique car il consomme énormément d'énergie (de l'ordre de 1250 à 1400 kcal par kg de clinker produit). Ce procédé tend pratiquement à disparaître actuellement [18].

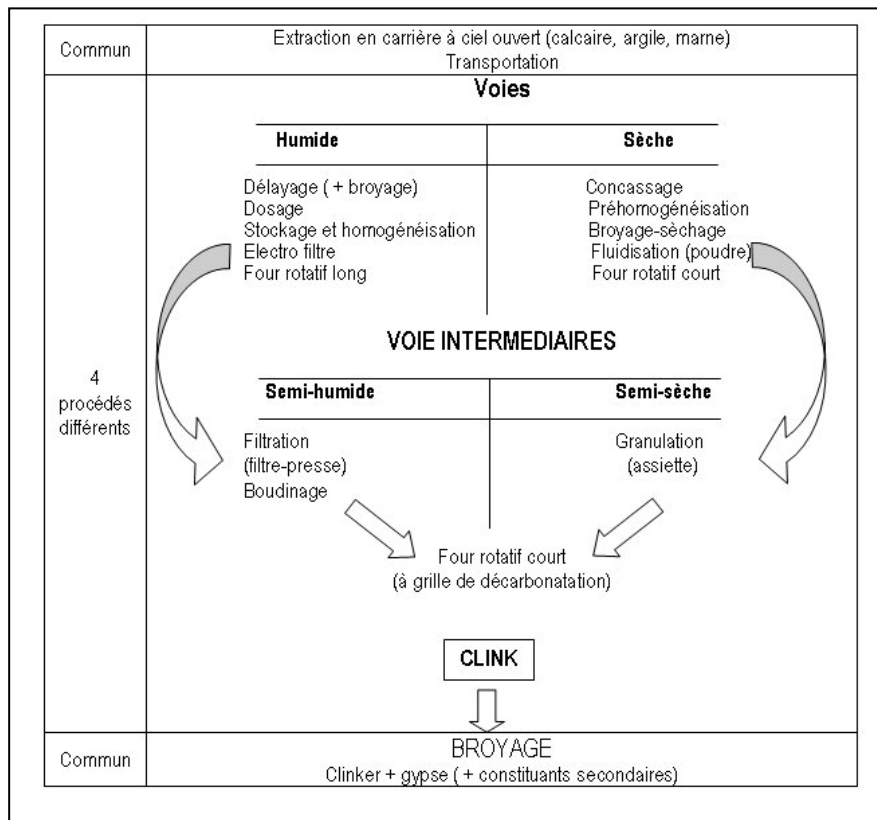


Figure 1.3 : Schéma de la fabrication du ciment.

1.5. LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT

Les opérations suivantes sont communes à tous les procédés :

- Extraction des matières premières,
- Stockage et broyage des matières premières,
- Cuisson pour obtention du clinker,
- Broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment.

1.5.1. Extraction des matières premières

Le calcaire et l'argile sont extraits de carrières situées à proximité des cimenteries. Abattus à l'explosif, les rochers et blocs sont transportés par des tombereaux (gros camions) vers des concasseurs afin de réduire leur taille et d'obtenir des cailloux de moins de 10 cm de diamètre. Ces matières premières font l'objet d'une sélection rigoureuse. Leur composition doit comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées [19].

1.5.2. Stockage et broyage des matières premières

Les minéraux concassés sont ensuite réduits en fines poudres dans la station de broyage pour être chimiquement plus réactives au cours de leurs cuissons dans le four, ce mélange appelé (matière crue) [20].

1.5.3. Cuisson pour obtention du clinker

La farine, précédemment préchauffée à 850°C est ensuite chauffée à 1450°C sous une flamme à 2000°C dans un four rotatif garni de brique réfractaires, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné [21]. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker. La décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de gypse, la marne se scinde en sa constituante silice et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation [22].

1.5.4. Broyage du clinker pour obtenir le ciment

Le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur, C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment.

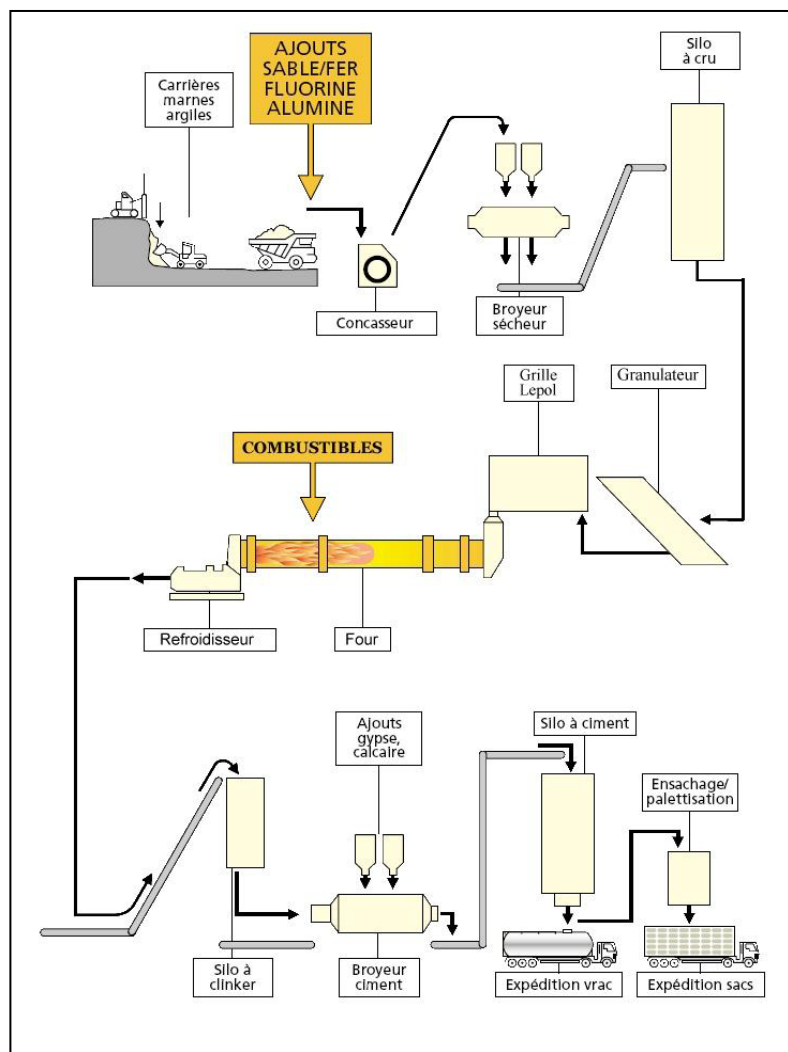


Figure 1.4 : Schéma d'appareillage de la fabrication du ciment

1.6. DIFFERENTS TYPES ET CLASSIFICATION DES CIMENTS

1.6.1. En fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés précédemment sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P 15-301 et ENV 197-1. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [16] :

- CEM I : Ciment portland artificiel (CPA),
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Le Tableau 1.3 représente les différents types de ciment en fonction de leur composition.

Tableau 1.3 [4] : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 - 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 - 35			-	-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-55			-	-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0 – 5

1.6.2. En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5 .classe 42,5 .classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du Tableau 1.4. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [23].

Tableau 1.4 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe [23].

Classe	Résistance alla compression (MPa) EN196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN196-3	EN196-3
	2jours	7jours	mini.	maxi.	(Um/m)	(min)	(min)
32		(17.5)	/32.5 (30)	≤52.5	≤800	/90	≤10
32.5R	/ (13.5) (12)	/ ≤	/32.5 (30)	≤52.5	≤1000	/90	≤10
42	/12.5 (10)		/42.5 (30)	≤62.5	≤1000	/60	≤10
42.5R	/20 (18)		/42.5 (30)	≤62.5	≤1000	/60	≤10
52	/20 (18)		/52.5 (50)			/60	≤10
52.5R	/30 (28)		/52.5 (50)			/60	≤10

1.7. UTILISATION DES DIFFERENTS TYPES DE CIMENTS

1.7.1. Le ciment portland CEM I

Utilisation : tous travaux en béton armé ou précontraint, coulés sur place ou en préfabriqués. Ils permettent un décoffrage et une mise en service rapide. Il représente 33 % de la consommation totale de ciment [24].

1.7.2. Le ciment portland composé CEM II

Utilisation : bétons d'ouvrages courants en élévation, dallages, maçonneries, stabilisation des sols. Il représente 53 % de la consommation totale de ciment.

1.7.3. Le ciment des hauts-fourneaux CEM III

Utilisation : ouvrages situés en milieux agressifs, travaux souterrains, ouvrages pour eaux usées ou industrielles, travaux à la mer.

1.7.4. Le ciment pouzzolanique CEM IV

Utilisation : il est destiné en particulier à des travaux massifs en béton armé ou précontraint, aux travaux maritimes et aux ouvrages étanches.

1.7.5. Le ciment au laitier et aux cendres CEM V

Utilisation : il est plutôt utilisé dans les milieux moyennement agressifs.

1.8. AUTRES TYPES DE CIMENTS

1.8.1. Ciments résistants aux sulfates : (C.R. S)

La teneur en C3S ne doit pas dépasser 50%, celle du C₃A 5% et la somme de C₃A et C₄AF ne doit pas être supérieure à 22% [16].

1.8.2. Ciments blancs

Ces ciments sont obtenus à partir des matières premières contenant le moins possible d'oxydes colorants (oxyde de fer, de manganèse, de chrome, de titane ...etc.)

Ces matières sont des calcaires, des craies ou des marbres purs, des argiles Kaolinitiques blanches. Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents [16].

1.8.3. Ciments colorés

Ces ciments sont obtenus par addition au clinker blanc de colorants minéraux résistants à la lumière et aux alcalis au cours du broyage ciment. On peut citer le bleu d'outre-mer, l'oxyde de chrome, le noir de fumée etc [16].

1.8.4. Ciments alumineux

Le ciment alumineux est un liant hydraulique prompt obtenu par la cuisson d'un mélange de bauxite et de chaux. Ces ciments sont fabriqués sans ajouts ou parfois en quantité très limitées 2% au maximum pour améliorer certaines de leurs propriétés. Ils sont utilisés pour les travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels, etc.) [16].

1.8.5. Ciment à maçonner

Ce ciment contient en proportions moindres les mêmes éléments actifs que le ciment portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ce dernier. Mais ses résistances sont moins élevées que celle de ce produit. Ils conviennent bien pour la confection de mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduits, crépis, etc.). Ils peuvent également être employés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles [16].

1.9. HYDRATATION DU CIMENT

Comme le ciment portland est un mélange hétérogène de plusieurs composés, son processus d'hydratation est un ensemble de réactions simultanées des substances anhydres avec l'eau [25]. Tous les composés ne réagissent pas de la même manière : les aluminates sont réputés pour réagir plus rapidement que les silicates, c'est pourquoi la rigidité (perte de consistance) et la prise caractéristique à la pâte de ciment portland sont généralement attribuées aux réactions des aluminates, alors que les silicates, constituant près de 75% du ciment ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le durcissement initial (taux de développement de résistance) du matériau.

1.9.1. L'hydratation des composants du ciment

1.9.1.1. Hydratation des silicates C_3S et C_2S

L'hydratation des silicates tricalcique et dicalcique produit une famille d'hydrates de structure semblable mais de rapport C/S très variable ; il en est de même pour la teneur en eau

combinée en général, les silicates de calcium hydratés produits sont peu cristallins et très poreux, présentant les caractéristiques d'un gel liquide. La stœchiométrie de ces composés est mal connue, leur structure varie avec la température, les proportions du mélange initial (rapport E/C) et l'âge d'hydratation.

Des études sur l'hydratation des alites en présence de gypse ont montré que le sulfate de calcium accélère l'hydratation du C_3S . Copeland et Kantro [26] reportent que l'hydratation à 1 jour est indépendante du degré de "gypsage", mais, à long terme 1 à 1,5% de SO_3 donne le degré d'hydratation maximum Bennir [27] lui aussi a reporté que la résistance à la compression et le degré d'hydratation des C_3S jusqu'à 48 heures sont indépendants du pourcentage de gypse introduit.

Les réactions d'hydratation complètes des pâtes de C_3S et C_2S seraient :



Quand le C_3S est mélangé à l'eau, à la température ambiante, la réaction se complète en plus d'un an selon sa finesse. Il est maintenant admis que deux types de réactions se produisent [28] :

- 1- Une réaction en solution où les réactifs se dissolvent pour donner des ions en solution, qui vont se combiner pour former par précipitation de nouveaux produits.
- 2- Une réaction topo chimique qui se produit à la surface du solide anhydre sans passage en solution des réactifs. Le mécanisme d'hydratation du C_3S se subdivise en 4 principales étapes [29].

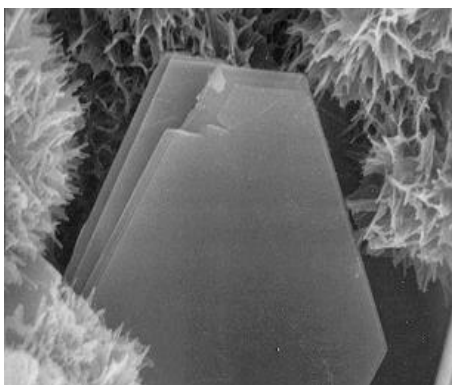


Figure 1.5 : $Ca(OH)_2$ et CSH [4]

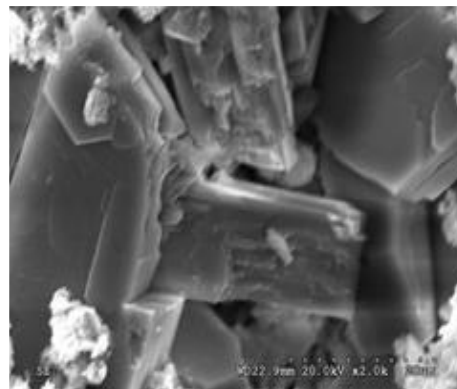


Figure 1.6 : Cristaux de portlandite [4]

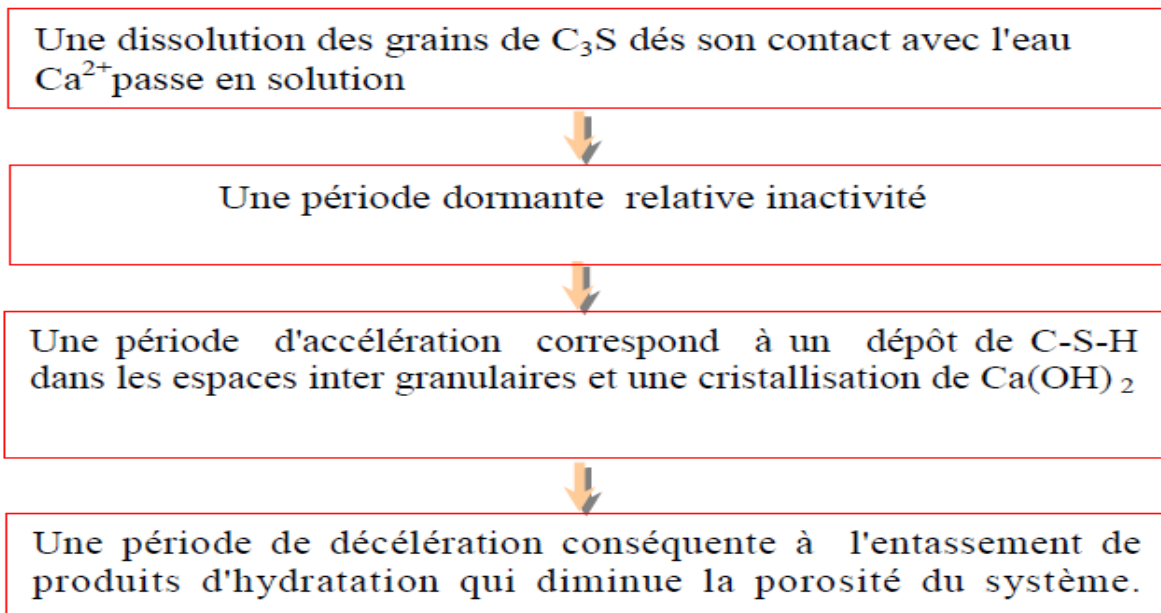
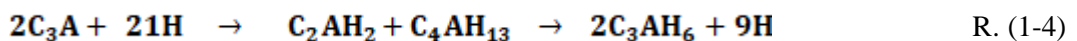
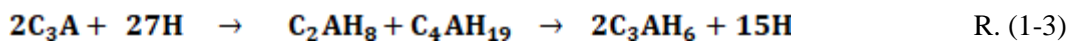


Figure 1.7 : Organigramme de mécanisme d'hydratation du C_3S

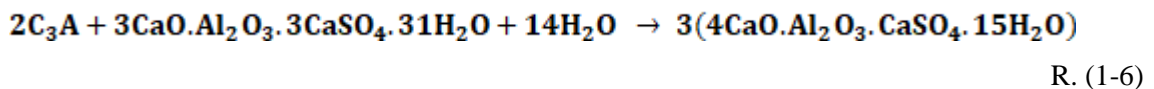
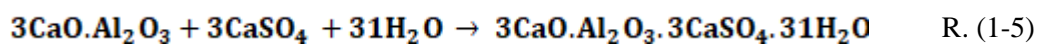
1.9.1.2. L'hydratation des aluminates C_3A

La phase aluminates composée de C_3A et C_4AF forme des hydrates, mais elle ne contribue que peu à la résistance de la pâte du ciment, elle est le responsable du phénomène dit de «prise éclair». L'hydratation du C_3A ; qui conduit à la formation d'hydro aluminates métastables qui disparaissent au profit de l'hydrogénât C_3AH_6 . Elle peut être représentée par les équations suivantes [23] :



Pour éviter ce phénomène (dite prise éclair), la réaction d'hydratation de C_3A et C_4AF doit être également contrôlée avec du gypse. Le C_3A et le gypse se dissout les premiers lors de l'hydratation du ciment. L'hydratation de C_3A conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou Étrangéité ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) (figure 1.7). Le C_3A s'enrobe ensuite d'une couche protectrice d'Ettringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recristalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques [30]. L'ettringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le C_3A est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le C_3A n'est pas complètement hydraté, l'Ettringite se transforme en Monosulfoaluminate tétra calcique hydratés.

Le Monosulfoaluminate cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. Sa structure est constituée d'une double couche d'hydroxyde avec une couche d'hydroxyde de calcium dans laquelle le tiers des ions calcium est remplacé par des ions Al^{3+} ou Fe^{3+} et des contre-ions sulfates entourés de molécules d'eau dans l'espace interfeuille. L'ettringite et les Monosulfates représentent 20 à 30% du ciment hydraté. La vitesse de recristallisation de l'ettringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de garder la maniabilité de la pâte dans les premières heures [30]. Les réactions d'hydratation sont comme suit :



De plus, si après la formation du Monosulfoaluminate tétracalcique il reste du C_3A , il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate.

La phase ferrique C_4AF adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase C_3A , les réactions sont cependant plus lentes, en présence d'eau et du gypse. L'hydratation de C_4AF est plus efficacement retardée que celle du C_3A .

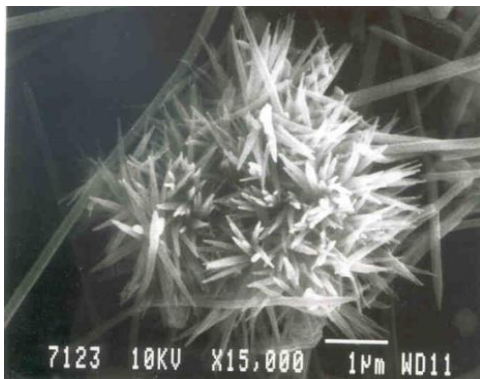


Figure 1.8: aiguilles d'ettringite [4]

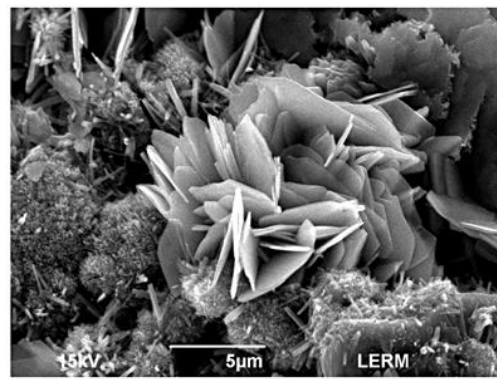


Figure 1.9: monosulfoaluminate hydraté [4]

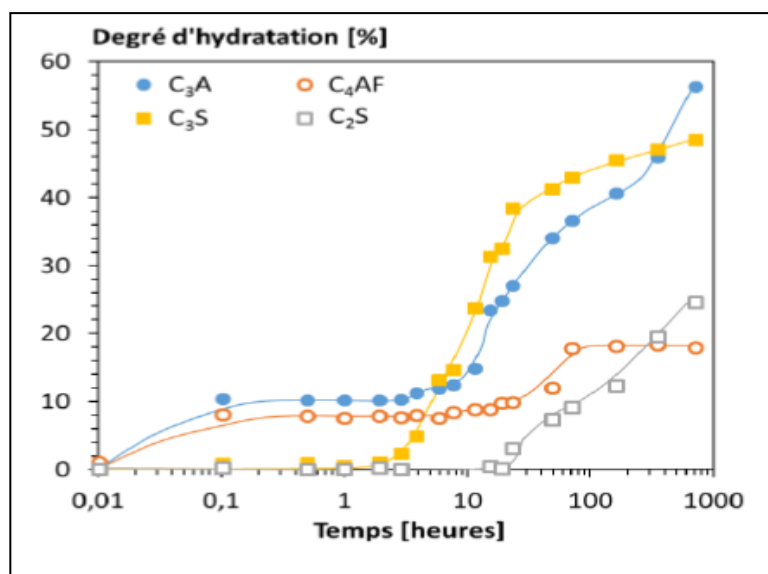


Figure 1.10 : Degré d'hydratation des phases C₃S, C₂S, C₄AF et C₃A en fonction du temps

[31]

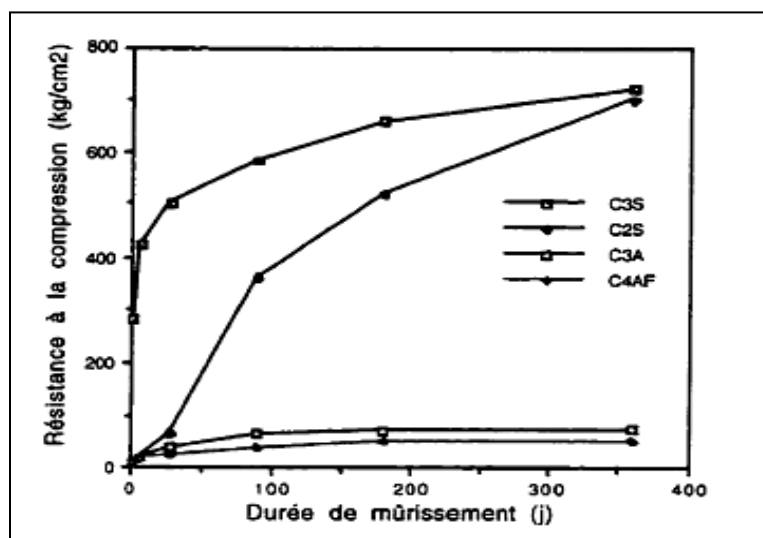


Figure 1.11 : Comparaison de la résistance à la compression des Phases du ciment en cours d'hydratation [32].

1.9.2. Évolution de l'hydratation

L'évolution de la réaction d'hydratation dans le temps se divise en quatre principales périodes la figure 1.11 illustre ces différentes périodes de la cinétique d'hydratation

Après contact avec l'eau et suite à des réactions chimiques, la poudre de ciment en état de suspension se transforme en un solide mécaniquement résistant [33].

Les composés anhydres du clinker qui sont solubles se dissolvent et enrichissent la solution en ions (principalement calcium, silicium, aluminium et soufre). Les réactions de dissolution sont des phénomènes exothermiques qui peuvent être suivis par calorimétrie. Schématiquement dans des conditions standards l'hydratation d'un ciment portland comprend 5 périodes [34] :

Période de gâchage : C'est la dissolution initiale des constituants du ciment. Elle est très Rapide et exothermique. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'étrangéité et des C-S-H (métastables).

Période dormante : Sa durée est de quelques heures et le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire, mais les réactions chimiques ont pourtant Commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, Hydroxydes et sulfates). Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des Constituants du ciment. Par conséquent, la formation des C-S-H et d'étrangéité se poursuit Lentement et la phase aqueuse devient sursaturée en chaux.

Période de la prise ou d'accélération : Cette période débute lorsque la concentration en Ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la Portlandite qui consomme ces ions. La chute de la teneur en Ca^{2+} et OH^- dans l'eau de gâchage Accélère la dissolution de tous les constituants du ciment. Il s'ensuit alors les mécanismes de Dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des Hydrates (étrangéité, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et la pâte devient de plus en plus solide. La Fin de période de prise est caractérisée par une accélération de l'hydratation.

Période de durcissement : Les résistances mécaniques se développent et la porosité se Remplit progressivement des C-S-H. Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche

d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel de C-S-H. La chaleur dégagée diminue. Le gypse est épuisé, Le C_3A résiduel réagit avec l'étrangerité pour former du mono sulfo aluminat de calcium.

Période de ralentissement : La diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle des grains de ciment devient de plus en plus lente, par conséquent, les réactions d'hydratation sont Limitées.

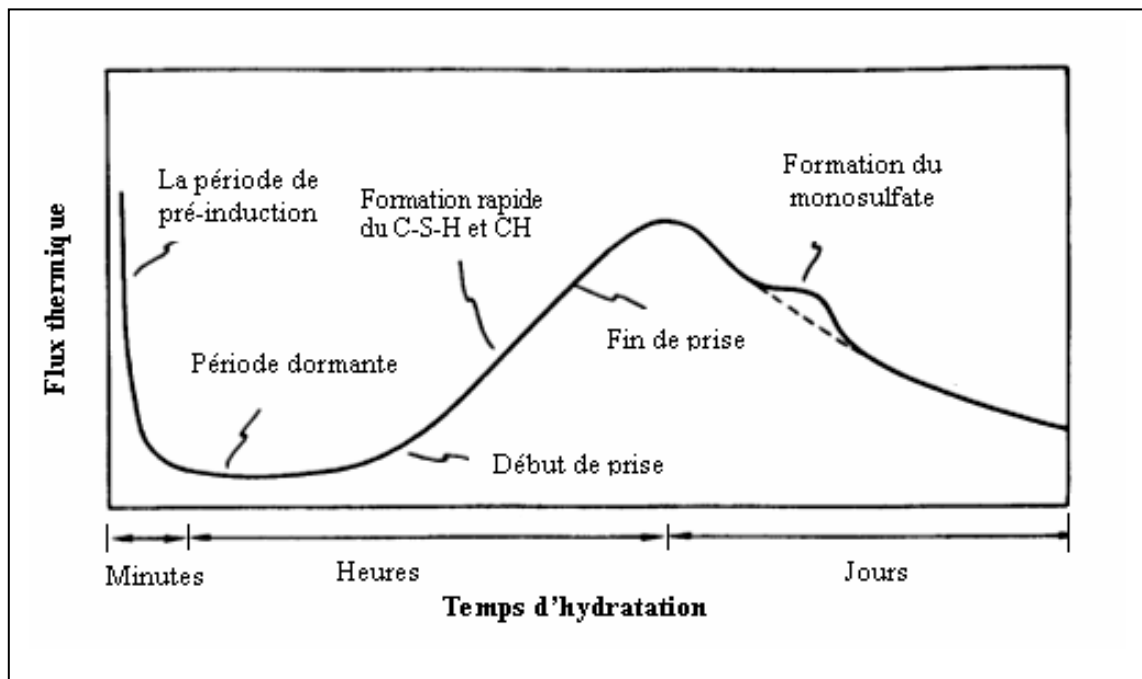


Figure 1.12 : Représentation schématique de la courbe calorimétrique de L'hydratation du ciment d'après Benste

CHAPITRE 1

**GENERALITES SUR LES
CIMENTS ET LA VALORISATION
DU DECHET**

PARTIE 02

**VALORISATION DES DECHETS
DANS
LE DOMAINE DU GENIE CIVIL**

CHAPITRE 1

Généralités sur les ciments et la valorisation des déchets

Partie 02 : Valorisation de déchet dans le domaine du génie civil

1.10. INTRODUCTION

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploitées en profondeur [35]. Dans ce qui suit, on expose d'abord les déchets (notion, classification, gestion des déchets), puis on abordera les résultats des études scientifiques menées sur la valorisation des déchets de verre, brique et laitier de haut fourneau dans le génie civil et plus particulièrement dans l'industrie cimentaire.

1.11. DEFINITION DES DECHETS

Le déchet est défini, d'après la loi Algérienne N°01-19 du 12/12/2001, comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation. Toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur est destiné à l'abandon ». Cependant, la notion de déchet est parfois ambiguë car ce qui est considéré comme déchet pour une personne, peut être considéré comme matière première pour une autre. Seuls les déchets ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter des pollutions de l'environnement [36].

1.12. CLASSIFICATION DES DECHETS

Les déchets sont généralement classés en fonction de leur provenance et de leur dangerosité. Le Tableau 1.5 donne un exemple de chaque classe :

Tableau 1.5 : Classification des déchets en Polynésie française 2018.

		Déchets dangereux (I)	Déchets non dangereux (II)	Déchets inertes (III)
Déchets ménagers	Ordures ménagères (OM)	Déchets ménagers spéciaux : Déchets toxiques et déchets toxiques en quantité dispersée	Ordures ménagères résiduelles (OMR)	Verre
			Déchets recyclables	Plastique non recyclable
	Déchets ménagers occasionnels		Déchets verts	Encombrants en métal et en plastique
			Textile (non souillé)	
			Encombrants en bois	
			Pneus	
	Carcasses de voitures			
Déchets industriels	Déchets industriels spéciaux : déchets des activités de soins à risques infectieux (DASRI), déchets d'amiante, déchets toxiques et déchets toxiques en quantité dispersée	Déchets assimilables aux déchets ménagers	Déchets du bâtiment et travaux publics	
		Déchets industriels banals		
		Boues d'assainissement		

1.13. GESTION DES DECHETS

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. La question de la gestion des déchets constitue un défi majeur pour tous les pays, plus particulièrement ceux en voie de développement, car ses effets sont fortement visibles par tous. La priorité en matière de gestion des déchets est la réduction à la source : cela consiste à en produire le moins possible, voire pas du tout. Dès lors que le déchet est produit, une hiérarchie des modes de traitement s'impose, justifiée par la finalité suivante : valoriser tout ce qui peut l'être afin de réduire le gaspillage des ressources sans porter atteinte à l'environnement et à la santé. En respectant les principes généraux suivant :

- réduction à la source de la quantité et de la toxicité des déchets produits,
- recyclage ou valorisation des “ sous-produits ” de la fabrication,
- prétraitement ou traitement interne ou externe enfouissement.

Le recyclage est l'un des procédés de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement, par incinération ou autre moyen. IL est défini comme la récupération de matériaux utiles, tels que le papier, le verre, le plastique et les métaux, ainsi que la transformation des matériaux, pour fabriquer de nouveaux produits afin de réduire la quantité de matières premières vierges nécessaires pour répondre aux demandes des consommateurs [8].

1.14. VALORISATION DU VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

Le verre est l'un des premiers matériaux fabriqués par l'homme 9000 ans. En raison de sa disponibilité, de ses propriétés mécaniques uniques et de propriétés chimiques et optiques, il a de nombreuses applications bénéfiques. En théorie, c'est un matériau 100% recyclable et peut être recyclé plusieurs fois Il n'y a pas de perte de qualité.

1.14.1. Définition de verre

Le verre est un matériau fragile et transparent. De côté scientifique, il semble plus difficile à définir avec précision mais généralement on peut dire que le verre est un solide non cristallin, amorphe aux rayons X c'est-à-dire comme celle d'un liquide figé, il possède une structure désorganisée dépourvue d'ordre à longue distance et n'y a aucune périodicité dans l'arrangement des atomes. Autrement dit, le verre est un solide obtenu par trempe d'un liquide surfondu [8].

1.14.2. Structure du verre

1.14.2.1. Composition chimique du verre

La composition chimique du verre dépend de ces éléments et leurs caractéristiques. En générale sa composition est celle présentée sur le Tableau 1.6.

Tableau 1.6 : Composition chimique du verre [37].

Sable (SiO ₂)	68 à 74 %
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	12 à 16%
Chaux (CaO)	7 à 14 %
Potasse (K ₂ O)	1%
Alumine (Al ₂ O ₃)	0,3 à 3 %
Oxyde d'antimoine (SbO)	0,3 à 3 %

1.14.2.2. Structure vitreuse du verre

La Figure 1.13. Présente un DRX sur une particule de verre qui présente un halot montrant la phase amorphe de ce matériau. [37].

Par verre, on désigne «un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse». Cette définition est plus générale, elle englobe les matériaux amorphes, c'est à dire les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n'ont pas la stabilité interne requise [38].

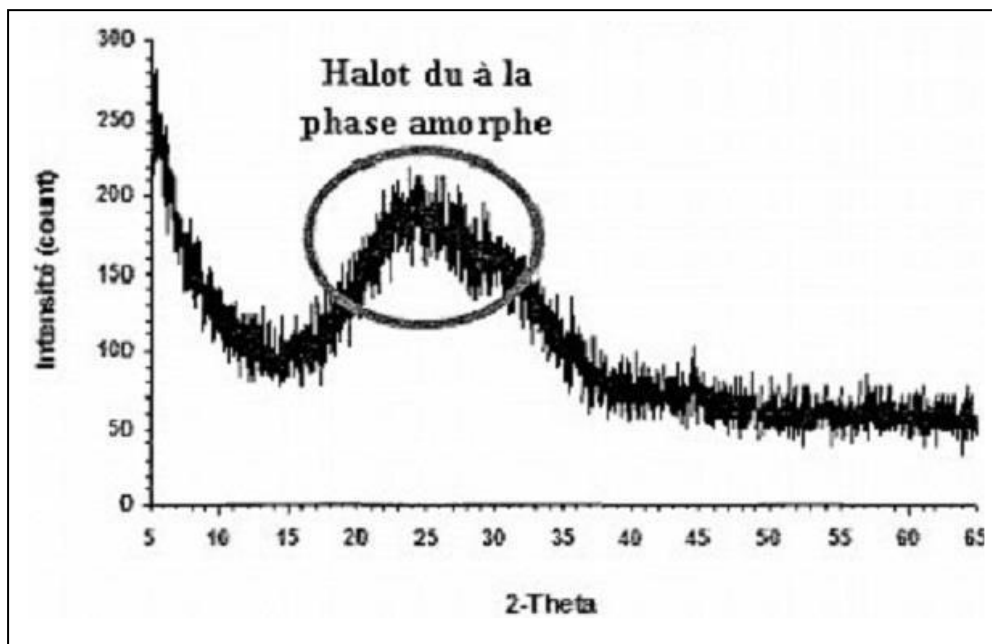


Figure 1.13 : Diffractogramme des rayons «X» du verre (Laboratoire des matériaux cimentaires alternatifs, université de sherbrooke) [37].

En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides, à plus grande échelle [39].

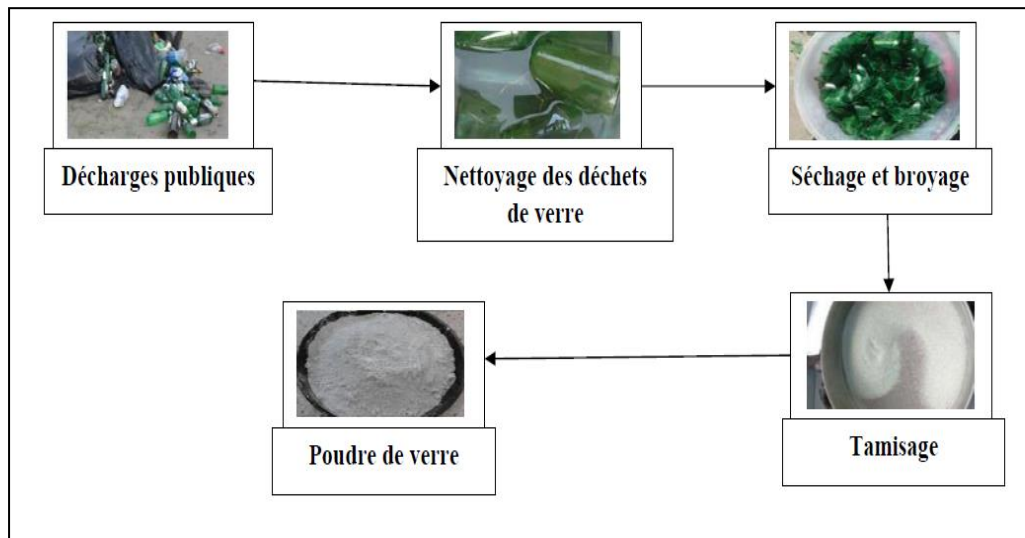


Figure 1. 14 : Transformation de déchets de verre en poudre de verre.

1.14.3. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment

Nous sommes intéressés dans le présent travail à l'utilisation de la poudre de verre comme ajout. Pour cette raison, nous allons exposer seulement les résultats des travaux traitant la valorisation de cette poudre dans le béton, le mortier, et ciment.

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciable de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans le ciment a suscité l'intérêt d'innombrables décideurs et ceux-ci ont encouragé de nouvelles études. Son utilisation dans les matrices cimentaires peut entraîner deux effets secondaires.

L'opposé : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique [40].

1.14.3.1. Réaction alcali-silice du verre

La forte teneur en silice du verre laisse prévoir qu'il peut développer d'importante réaction alcali-silice lorsqu'il est utilisé comme substituant partiel des granulats dans le béton. Par contre lorsqu'il est broyé et utilisé comme ajout cimentaire, cette propriété est utilisée à

l'avantage pour développer d'important effet pouzzolanique suite à la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite [41].

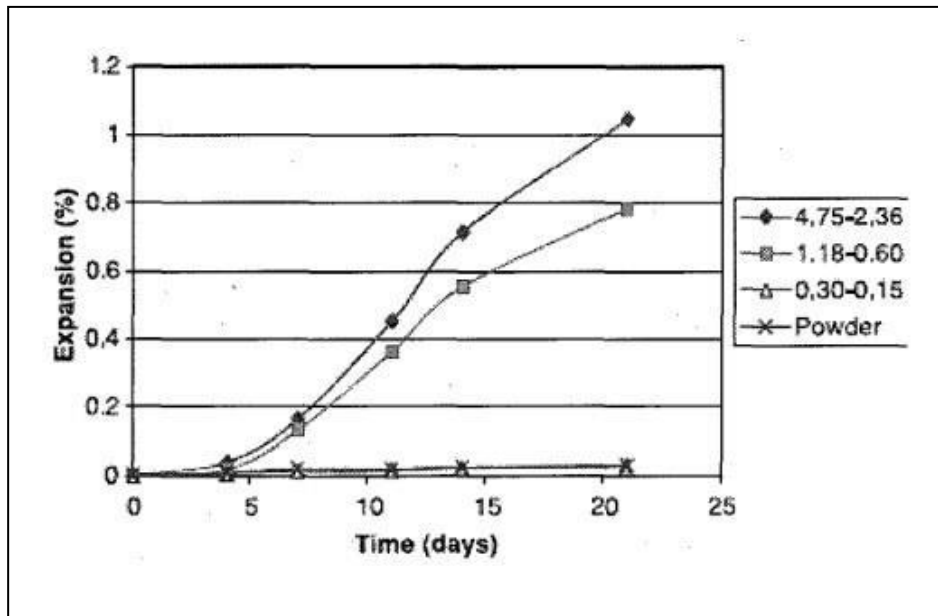


Figure 1.15 : Expansion due à la RAG (réaction alcali-granulats) sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (Shayan et al, 2004) [41].

1.14.3.2. Rôle des pouzzolanes dans la réduction des expansions dues à la réaction alcali-silice (ciment -verre)

Dans sa thèse, (Idir, 2009) [42] mentionne que les fines de verre soit la poudre de verre peut servir à inhiber l'expansion. Cependant, il faut rester prudent, car la teneur élevée en alcalis du verre peut fournir une grande quantité d'alcalis à la solution interstitielle pouvant entraîner des expansions importantes. (Shi et al. 2005) [43] ont expérimentés sur des mortiers incorporant des cendres volantes (20%) ou de la poudre de verre (20%). Ces derniers ont développé des expansions beaucoup plus faibles que celle du témoin, mais les expansions développées sont supérieures à la limite de 0,10% à 14 jours. Le mortier avec cendres volantes a une expansion plus faible que celui avec poudre de verre. Ces derniers mentionnent qu'un remplacement de 30% du ciment par des cendres volantes est généralement recommandé afin de contrer l'expansion délétère due à la réaction alcalis-silice (R.A.S) [44].

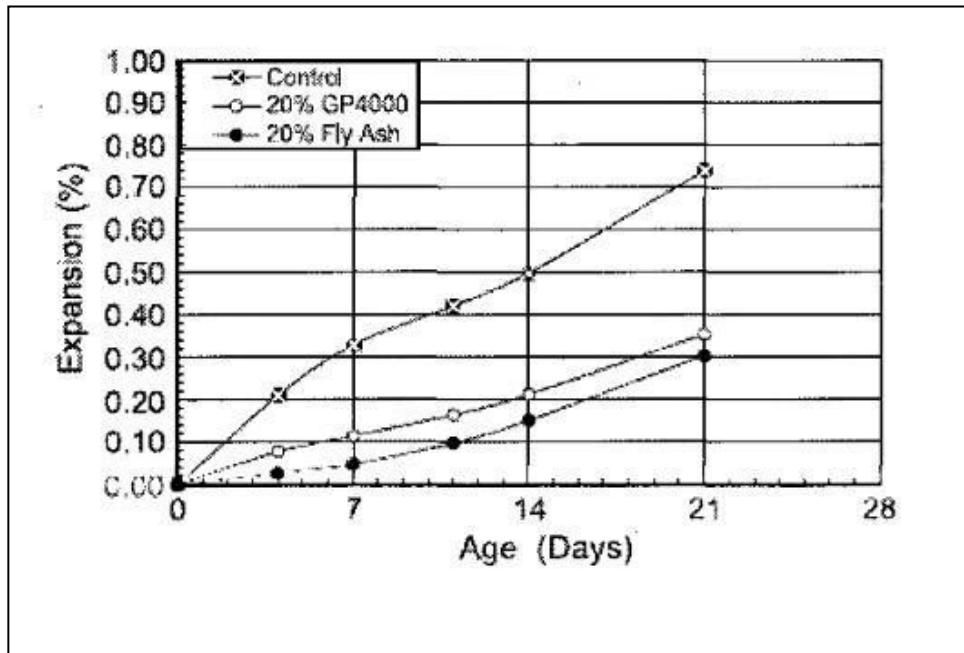


Figure 1.16 : Expansion due à la RAG a 23°C (SHI et al, 2005) [43].

1.14.3.3. Réaction pouzzolanique (ciment-verre)

La poudre de verre est une forme de pouzzolane qui peut être utilisée dans la production de béton pour induire la réaction pouzzolanique. Lorsque la poudre de verre est ajoutée à un mélange de ciment et d'eau, la silice amorphe présente dans la poudre de verre réagit chimiquement avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment Portland pour former des silicates et des aluminates hydratés de calcium. Cette réaction améliore la résistance et la durabilité du béton, en particulier sa résistance à l'abrasion, à la corrosion et à la pénétration d'eau. Selon la réaction suivante :



1.14.3.4. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique

Ils existent plusieurs facteurs qui influent sur la réaction pouzzolanique de la poudre de verre : la finesse du verre, le taux du verre, la couleur du verre et la température de mûrissement. (Shayan et al, 2004) [45]. Dans leur étude ont remarqué que :

- La poudre de verre de finesse Blaine relativement élevée de 800 m²/kg développe des réactions pouzzolaniques importantes.

- Le taux du verre : La résistance des mortiers et des bétons diminue en fonction de leur teneur en verre [41].

D'autres études sur le béton ordinaire réalisé par (Shayan et al, 2006) [44]. Montrent que :

- On peut incorporer jusqu'à 30 % de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment.
- La couleur du verre : Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc.
- La température : La température de cure élevée accélère l'activation de la réaction pouzzolanique du verre (Idir, 2009) [42].

Les résultats de l'étude de (SHI et al, 2005) [43] montrent que, la réaction pouzzolanique est d'autant plus importante que la finesse est élevée, ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes. Les résultats de cette étude sont illustrés dans la (Figure 1.17) [41].

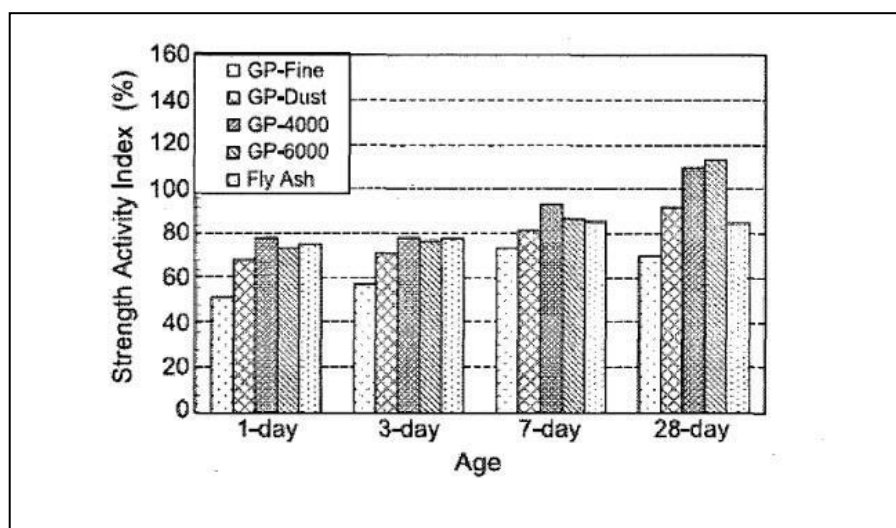


Figure 1.17 : Activité pouzzolanique de la poudre de verre (Shi et al, 2005) [43].

1.14.4. Bénéfices de l'intégration de la poudre de verre comme ajout cimentaire

- ❖ Meilleure imperméabilité ;
- ❖ Durabilité accrue à long terme ;
- ❖ Matière de couleur blanche à l'état naturel ;
- ❖ Amélioration du bilan de carbone en favorisant la valorisation de matériaux recyclables ;
- ❖ Proximité de la source d'approvisionnement ;
- ❖ Accroissement de la résistance en compression à moyen terme [46].

1.15. VALORISATION DU DECHET DE BRIQUE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

Les briques, depuis longtemps, sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication de briques a passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique stabilisée.

La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations [47].

1.15.1. Brique de terre cuite

Les matériaux de terre cuite ont été utilisés depuis plusieurs siècles, ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, dans le domaine traditionnel industriel. Ils sont fabriqués à partir d'argile devenant souvent rouge à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose à jaune et blanc [48].

1.15.2. Fabrication des produits de terre cuite

La fabrication des produits de terre cuite, tel que les briques impliquent plusieurs étapes importantes [47] :

- **Extraction de l'argile** : L'argile est la matière première utilisée pour fabriquer les produits de terre cuite. Elle est extraite à partir de carrières ou de gisements d'argile.

- **Préparation de l'argile :** L'argile extraite est mélangée avec de l'eau pour former une pâte qui est ensuite tamisée pour éliminer les impuretés et obtenir une pâte homogène.
- **Moulage :** La pâte d'argile est placée dans des moules pour former des briques, des tuiles ou des blocs de construction. Les moules peuvent être en bois, en plastique ou en métal.
- **Séchage :** Les produits moulés sont ensuite séchés à l'air libre pendant plusieurs jours. Pendant cette étape, l'excès d'eau est évaporé et les produits se durcissent.
- **Cuisson :** Les produits séchés sont ensuite placés dans un four à haute température pour la cuisson. La température peut varier en fonction du type de produit et de l'argile utilisée. Pendant la cuisson, les produits se solidifient et durcissent encore plus.
- **Finition :** Après la cuisson, les produits peuvent être émaillés ou peints pour leur donner une finition lisse et résistante aux intempéries.

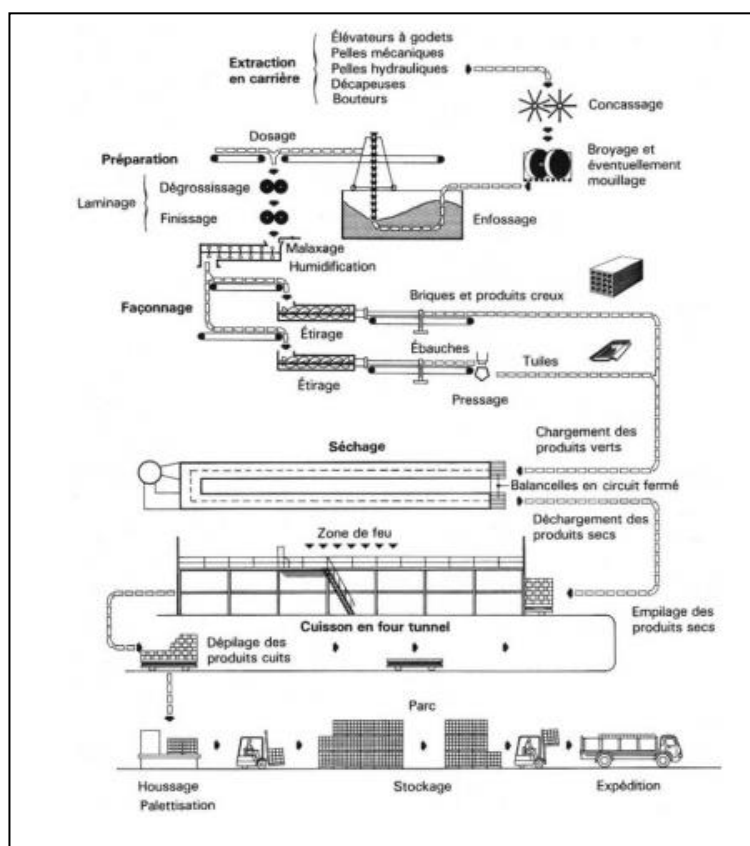


Figure 1.18 : Fabrication des produits de terre cuite.

1.15.3. Utilisation de la poudre de brique comme substituant du ciment

Dans les mortiers ou les bétons à base de ciment, la poudre de brique peuvent être utilisées comme un ajout dans les formulations tel un filler calcaire. Elles peuvent aussi directement remplacer une partie du clinker dans l'élaboration d'un ciment composé.

L'utilisation des fines de brique en remplacement d'un filler calcaire a été étudiée par Chen et al. [49]. De meilleures performances mécaniques sont obtenues avec les formulations à base de fines de brique. Cette étude démontre une activité des fines de brique permettant une amélioration des performances mécaniques.

Dans les formulations avec un liant hydraulique tel que le ciment, différentes propriétés chimiques des fines de brique sont mises en avant. Une des propriétés majeures de la brique est son activité pouzzolanique, associée à l'effet de nucléation. Le travail de Wild et al [50]. sur un panel de briques provenant de toute l'Europe démontre l'activité pouzzolanique des briques et leurs propriétés. Dans un premier temps, la réaction d'hydratation du ciment entraîne une production de chaux en même temps que la formation des C-S-H. Par la suite, avec l'apport en silice et en alumine sous forme amorphe, les fines de brique réagissent avec la chaux et des C-S-H pouzzolaniques et des C-(A)-S-H peuvent être produits. L'activité pouzzolanique des fines de brique varie en fonction de différents paramètres : la quantité en phase amorphe disponible (silice et alumine), la taille des grains et la surface spécifique [50].



Figure 1.19 : Poudre de brique rouge utilisé.

1.15.4. Composition chimique de la poudre de brique

La composition chimique de la poudre de brique peut varier en fonction de la source et de la qualité des briques utilisées pour la production de la poudre. En général, la poudre de brique est principalement composée de silice (SiO_2), d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Elle peut également contenir d'autres composés tels que du calcium (CaO), du magnésium (MgO) et des traces d'autres métaux [51].

Tableau 1.7 : Composition chimique des déchets de briques [4].

Eléments	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
(%)	4.28	14.17	6.30	69.26	2.25	0.28	1.34	0.02

1.15.5. Activité pouzzolanique

La brique est un matériau essentiellement alumino-silicaté qui, sous forme de fines, peut être qualifié de matériau potentiellement pouzzolanique. Une pouzzolane est définie dans la norme ASTM C618-05 de la façon suivante : « Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes, mais qui sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes », [52] , Les briques peuvent aussi être caractérisées par leur quantité d'oxydes , $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 (+ \text{CaO}_2) \geq 70 \%$, qui les inclut dans les pouzzolanes et en partie dans les verres en fonction de la quantité de phase amorphe. Sur base de la teneur en 3 oxydes principaux, les matériaux réactifs – hydrauliques et pouzzolaniques – sont classés sur le diagramme triangulaire de Keil (Figure 1.20).

Un matériau pouzzolanique va, en présence d'eau, se combiner avec la chaux pour former des hydrates types C-S-H pouzzolanique qui contribue aux performances et à la durabilité des liants réalisés. Les C-S-H pouzzolaniques se différencient des C-S-H produits par l'hydratation du ciment par leur rapport Ca/Si plus faible [53]. Cette propriété est essentielle à déterminer pour envisager l'utilisation des fines de brique sous forme de substitut dans les mélanges hydrauliques.

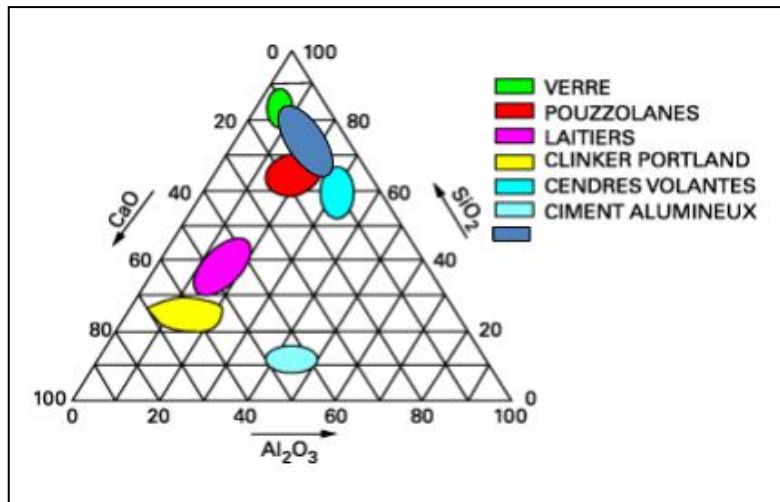


Figure 1.20 : Diagramme de Keil avec ajout du matériau brique [8].

1.15.6. Bilan de la valorisation des briques

Dans un premier temps, le fait de valoriser un matériau permet un gain économique et écologique. La réutilisation de brique entraîne une diminution des coûts de fabrication des bétons ou mortiers ainsi qu'une diminution du rejet de CO_2 provoqué par la fabrication du ciment.

L'ajout de brique en faible quantité dans des liants hydrauliques permet un affinement de la microstructure ainsi qu'une augmentation des résistances mécaniques (flexion, compression). Ceci entraîne de meilleures performances en durabilité : résistance aux sulfates, à la réaction d'alcali-silice, diminution de la diffusion des chlorures, résistance au gel-dégel et à l'abrasion.

Pour les mélanges avec des fines de brique, il faut bien connaître les caractéristiques physico-chimiques des fines. La quantification de la phase amorphe, la granulométrie ainsi que l'activité pouzzolanique sont trois des paramètres à identifier avant de formuler des matériaux à base de fines de brique.

Dans les matériaux alcali-activés, un des avantages majeurs de l'utilisation de briques est celui de voir le temps de prise augmenter et ainsi avoir une meilleure maniabilité du matériau.

La valorisation des briques peut également toucher un aspect esthétique de l'architecture. Les liants mixtes formulés à base de fines de brique peuvent être naturellement colorés selon le pourcentage de fines et la couleur initiale de la brique : la teinte peut varier du rouge brique au marron clair. Au-delà des performances mécaniques [54].

1.16. VALORISATION DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

Le laitier est un sous-produit des industries du fer et de l'acier et est bien souvent classé comme déchet industriel ou considéré comme tel par certaines entreprises de construction, à tort. En réalité, il peut être valorisé en divers matériaux de construction polyvalents suivant leur traitement après fabrication [55].

1.16.1. Laitiers de hauts fourneaux

La production d'une tonne de fonte génère 250 à 300 kg de laitier de haut fourneau. Pour l'élaboration de la fonte, le haut-fourneau (Figure 1-21) est alimenté par un mélange de minerai de fer, de coke et de chaux. De l'air chaud (à 1200 °C) est ensuite insufflé dans la tuyère et provoque la combustion du coke. Des réactions d'oxydation et de réduction ont lieu et il se forme de la fonte et un liquide essentiellement chargé d'oxydes. Ce résidu est appelé laitier de haut fourneau [56].

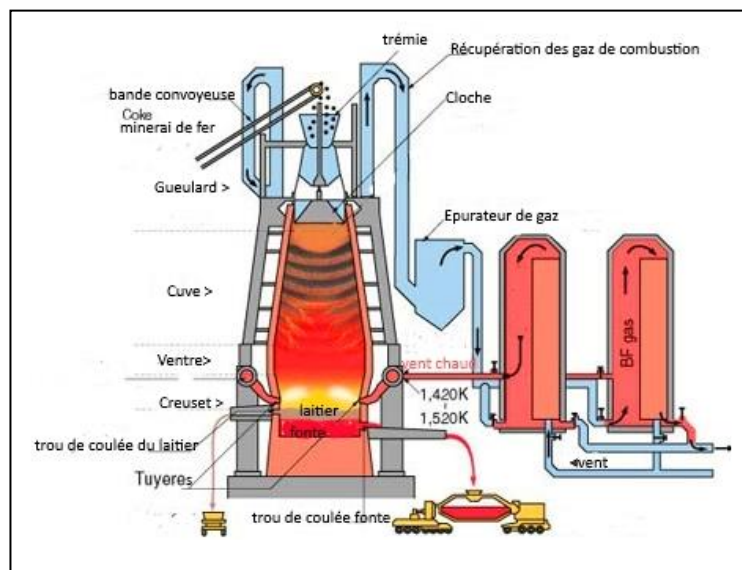


Figure 1.21 : Schéma de principe d'un haut fourneau.

1.16.2. Composition chimique du laitier

Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (> 90 %) de quatre oxydes ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$). Ils contiennent également des petites quantités des oxydes ($\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$) et des quantités insignifiantes des sulfures ($\text{CaS} - \text{MnS} - \text{FeS}$) [57].

Cette composition dépend de plusieurs facteurs ; elle varie suivant la nature du minérale, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement [58].

Le Tableau (1.8) présente la variation des principaux éléments constituant le laitier du haut fourneau :

Tableau 1.8 : Variation de la composition chimique du laitier [59].

Matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO
Laitier	28 à 38	8 à 24	1 à 3	30 à 50	1 à 18	1 à 2,5	1 à 3

1.16.3. Composition minéralogique du laitier

Dans un haut fourneau, le minerai de fer est réduit au moyen de coke, en fer métallique, tandis que la silice et l'alumine se combinent avec la chaux et le manganèse pour former un laitier fondu qui se ressemble au-dessus de fer en fusion, au fond du haut fourneau.

Le fer dissout lui-même certains constituants en une forme réduite, notamment le silicium, le manganèse et le soufre. La réparation du soufre entre le fer et le laitier est importante. Pour favoriser la dissolution du soufre dans le laitier, on augmente soit la température soit la teneur en CaO du laitier, cette dernière augmentation entraîne en tous cas un accroissement de la température pour maintenir la fluidité [60].

1.16.4. Valorisation du laitier dans l'industrie cimentaire

Actuellement, l'introduction du laitier dans le cycle de fabrication du ciment par des teneurs variables, permet une réduction considérable du coût énergétique de la fabrication des ciments (réduction des combustibles de 30 à 40 %) [61], ainsi que l'obtention des ciments présentant des caractéristiques physico-chimiques intéressantes telles que la résistance aux milieux agressives, et le faible retrait. Son utilisation se fait :

- Soit, en mélange avec le clinker, avant le broyage pour la fabrication des ciments Portland au laitier [58] ;
- Soit, en mélange avec du calcaire comme matière première pour la préparation du clinker par voie sèche, qui est souvent mélangé à son tour avec du laitier [61] ;
- Soit, par broyage du laitier à une finesse appropriée pour être utilisé seul comme liant, en présence d'un catalyseur à base d'alcalis ou de sulfate [61].

1.16.5. Caractéristiques du laitier destiné à la fabrication du ciment

a) **Forte hydraulicité**, et donc taux de vitrification élevé (≥ 90 %), on emploie donc du laitier granulé ou bouleté) ; teneur en chaux aussi forte que possible, qui favorise la prise. Une teneur en alumine élevée est parfois recherchée parce qu'elle améliore la résistance initiale (en Allemagne, enfourné de la bauxite au haut-fourneau dans ce but) ; l'effet de la teneur en MgO est discuté et ne présente aucun risque de gonflement [58].

L'activité hydraulique des laitiers croît avec l'augmentation du module de basicité et celui d'acidité. Plus le module d'acidité est grand plus la vitesse de durcissement du laitier broyé est rapide. Il faut tenir compte de ce que les laitiers diffèrent d'une même composition chimique peuvent être les uns actifs et les autres presque entièrement incapables de former un liant hydraulique, cela dépend de la structure des laitiers après refroidissement [62].

Le module de basicité :
$$M_b = \frac{\%C_aO + \%MgO}{\%S_iO_2 + \%Al_2O_3}$$

Lorsque : $Mb > 1$ \longrightarrow les laitiers sont dits « alcalins »

$Mb < 1$ \longrightarrow les laitiers sont dits « acides » [62].

Module d'acidité
$$M_a = \frac{\%Al_2O_3}{\%S_iO_2}$$

- le laitier est basique si $0,17 < M_a < 0,25$;
- le laitier est acide si $0,33 < M_a < 0,40$.

b) **Bonne aptitude au broyage**, on doit éviter l'emploi de laitier coulé froid qui donne des grains durs [58].

c) **Teneur en eau inférieure à 10 %**, pour éviter ou limiter les frais de séchage avant broyage. [58].

1.16.6. Caractéristiques des ciments contenant le laitier

1.16.6.1. Évolution de la résistance dans le temps

Comme tous les ciments, le comportement mécanique des ciments au laitier est influencé par plusieurs facteurs tels que : la composition chimique, la finesse de mouture, les conditions de cure et la nature et la concentration de l'activant.

La Figure (1.22) compare l'évolution de la résistance à la compression d'un ciment CPA et celle d'un CHF [58] :

- le ciment CHF prend plus lentement au départ, ce qui nécessite de garder le béton humide assez longtemps, et de prendre des précautions quand il faut décoffrer rapidement.

Des adjuvants, comme des chlorures, peuvent accélérer la prise ;

- à long terme, la résistance du ciment CHF dépasse celle du CPA, d'où l'emploi du ciment au laitier vient quand la résistance finale doit être élevée.

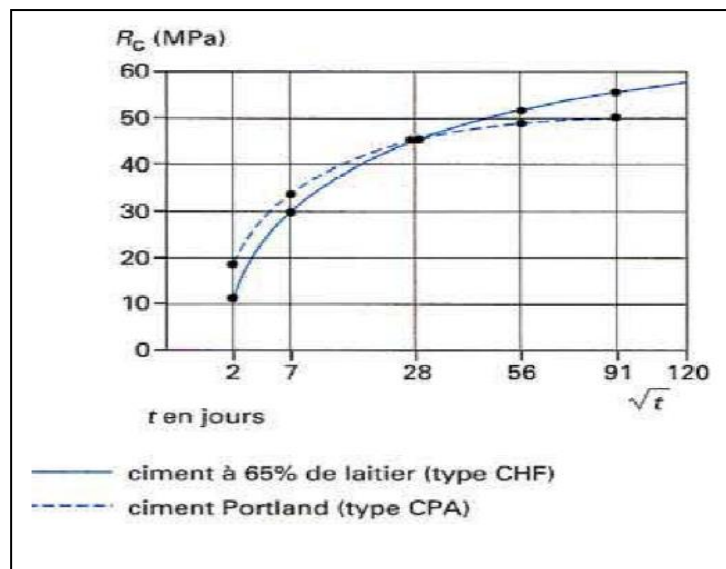


Figure 1.22 : Évolution de la résistance à la compression R_C de deux ciments en fonction du temps t [58].

1.16.6.2. Effet de la chaleur d'hydratation

Les ciments ont une chaleur d'hydratation d'autant plus faible que la teneur en laitier est plus forte (Figure 1.23), la température au cœur du béton est donc plus faible avec les fortes teneurs en laitier, ce qui réduit le risque de fissuration et fait conseiller l'emploi des CHF et des CLK pour les grandes masses de béton. La mise en œuvre de ces ciments est plus facile par temps chaud, par contre, par temps froid, ils sont plus sensibles au gel que les autres [58].

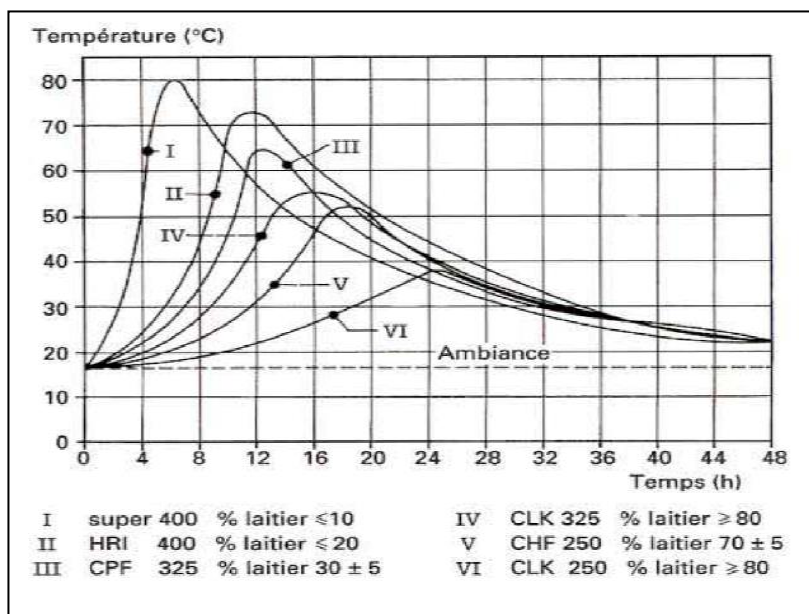


Figure 1.23 : Élévation de la température au moment de la prise du ciment [58].

1.16.6.3. Résistance aux agressions chimiques

Du fait de leur teneur en chaux faible ou nulle, les ciments CHF et CLK sont peu sensibles à l'attaque des eaux acides, des eaux chargées en chlorures ou en sulfates, et des eaux très pures. Ils sont donc recommandés pour les ouvrages marins, les égouts, les travaux dans la nappe phréatique, etc [58].

1.16.7. Méthodes d'activation du ciment au laitier

Le ciment avec ajout minéral présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral, nécessite l'emploi d'un bon activant.

1.16.7.1. Activation thermique

L'activation thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) consiste à conserver le matériau (éprouvette) dans une étuve à vapeur à différentes températures de cure 20, 40 et 60°C pendant 7 jours. Ensuite, il sera mis dans un bassin d'eau à une température de 20°C jusqu'à la date de l'essai mécanique programmé (généralement 7, 14 et 28 jours) [4].

1.16.7.2. Activation mécanique

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse du ciment par broyage poussée. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante). Le broyage est plus facile quand le clinker possède plus de C_3S , moins de C_3A , le plus possible de petits cristaux [4].

1.16.7.3. Activation chimique

Généralement le ciment portland composé est activé par différentes solutions alcalines, en faisant varier la molarité de la solution basique. Les activateurs chimiques accélérateurs de prise (soude $NaOH$, potasse KOH) et de durcissement (chlorures de calcium $CaCl_2$) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsqu'un durcissement rapide est souhaité. Shi et al. 2000 [63], ont publié une série de recherches sur l'activation des pouzzolanes naturelles et de cendres volantes. Ils ont constaté que Na_2SO_4 et $CaCl_2$ sont les activateurs les plus efficaces des matériaux pouzzolaniques. L'addition de ces deux activateurs est beaucoup plus efficace que le prolongement du broyage des pouzzolanes naturelles ou l'augmentation de la température de calcination.

1.17. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à une brève recherche bibliographique relative aux caractéristiques des ciments et déchets de verre, déchets de brique et le laitier de haut fourneau. Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, nous devons accorder beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. Les déchets et les sous-produits peuvent être utilisés comme constituant principal du clinker ou comme granulats pour le béton.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 2

Matériaux et procédures expérimentales

2.1. INTRODUCTION

Dans ce deuxième chapitre, on présentera les essais de caractérisation effectués sur les ciments élaborés. Ces essais qui ont été conduits conformément aux différentes normes Algériennes et Européennes, sont réalisés dans le laboratoire du contrôle continu de cimenterie de Hdjar-soud Wilaya de Skikda et le laboratoire pédagogique du département de Génie Civil et Hydraulique de notre université (8 Mai 1945 de Guelma).

2.2. PREPARATION DES NOUVEAUX CIMENTS

Les nouveaux ciments sont obtenus par homogénéisation :

- Ciment CEM I – CPA 42.5 fabriqué à la cimenterie de Sigus Oum El Baoughi.
- Poudre de verre provient du broyage des chutes de verres plats transparents des fenêtres collectés auprès du laboratoire pédagogique du département de Génie Civil et Hydraulique de notre université (8 Mai 1945 de Guelma).
- poudre de brique rouge issu du broyage des déchets de brique rouge de maçonnerie fabriquée à la briqueterie de Ben Djerah.
- la poudre du laitier du haut fourneau, extrait du haut fourneau d'El hadjar Annaba

Ces déchets, Après nettoyage, séchage, concassage ont fait l'objet d'un broyage et un tamisage (tamis 80 μ m) les poudres obtenues sont ajoutées au ciment CEM I.

Après dosage et homogénéisation, nous avons élaboré un échantillon de ciments composé en faisant des déchets à 20 %.

Tableau 2.1 : Désignation et dosage des ciments élaborés.

Ciment	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
CPA (%)	100	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Laitier (%)	0	7.5	8.333	5	7.5	5	5	10	5.833	5.833	6.667
Brique (%)	0	7.5	5.833	7.5	5	10	5	5	8.333	5.833	6.667
Verre (%)	0	5	5.833	7.5	7.5	5	10	5	5.833	8.333	6.667

Le Tableau 2.1 regroupe les ciments élaborés et la teneur de chaque constituant. L'utilisation de la poudre de verre et la poudre de brique dans la fabrication du ciment n'entre pas dans le champ de la norme Algérienne du ciment NA442, (2013) [64], mais il répond à la démarche environnementale adoptée par les cimentiers pour réduire l'émission des gaz à effet de serre.

**Figure 2.1** : Matériaux utilisés.



Figure 2.2 : Broyage des déchets.

2.3. ESSAIS EFFECTUES

2.3.1. Préparation des mortiers normalisés

Le sable normalisé [un sable naturel, siliceux, le plus quartzeux possible en particulier dans sa partie fine, propre, à grains arrondis et sec, livrée en sacs étanches contenant 1350 g correspondant à la préparation de 3 éprouvettes (4x4x16)cm³ et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau en utilisant les proportions suivantes selon la Norme EN196-1(2016) [65] :

- 450 g \pm 2 g de ciment.
- 1350 g \pm 5 g de sable normalisé.
- 225 g \pm 1 g d'eau potable de robinet.

Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.50. Avant d'être utilisé pour les différents essais ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de (Voir le Tableau 2.2)



Figure 2.3 : Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé.



Figure 2.4 : Sachets de sable normalisé.

Tableau 2.2 : Malaxage d'un mortier normal [65].

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	30 s	15 s	75 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

Avec le mortier normal préparé on remplit un moule (4x4x16) cm³. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Le moule est arasé et vibré. Après 24 h du début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 °C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai.

2.3.2. Essais de caractérisations chimiques

2.3.2.1. Composition chimiques par fluorescence X

L'analyse chimique par spectromètre à fluorescence X [66] consiste à déterminer le pourcentage des différents oxydes dans la matière à étudier (SiO₂, AlO₃, Fe₂O₃, MgO, Cl-, Na₂O, K₂O, SO₃) ainsi le calcul des modules et des indices. Dans son principe, un faisceau des rayons X est dirigé sur l'échantillon à analyser, provoquant l'émission par ce dernier des radiations X secondaire, dites de fluorescence. Ces radiations ont les longueurs d'onde caractéristiques de chaque élément contenu dans l'échantillon. La radiation est canalisée vers un cristal analyseur qui sépare les diverses longueurs d'ondes et les diffracte vers un détecteur. Les couches d'électrons concernées sont principalement les couches inertes (K, L). La mesure de l'intensité de chacune des raies caractéristiques des éléments à analyser (Ca, Si, Al, Fe, etc.) est faite par spectromètre.

Tableau 2.3 : Compositions chimiques des matériaux utilisées.

Matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
Brique	64.30	20.80	6.60	0.85	1.25	0.10	1.94	0.23	0.028
Verre	58.94	0.94	0.02	8.26	2.81	0.07	0.51	14.01	
Laitier	37.50	8.39	0.79	41.11	3.41	0.36	0.92	0.14	

**Figure 2.5** : Spectromètre à Fluorescence X.

2.3.2.2. Perte au feu (PAF)

La perte au feu est l'élimination de CO₂, l'eau de constitution et les matières organiques. La PAF a été déterminée en atmosphère oxydante (air) et conduite selon les prescriptions de la norme Algérienne NA235 [67] et sa vérification est faite selon la norme NA442, 2013.



Figure 2.6 : Four de calcination pour PAF.

2.3.2.3. Teneur en (CAO) libre

La teneur en chaux libre dans le clinker et les ciments élaborés est déterminée conformément à la norme NA2187 [68].



Figure 2.7 : Essai de la teneur en CaO libre.

2.3.3. Essais de caractérisations physiques

2.3.3.1. Masse volumique absolue des ciments anhydres

Les masses volumiques sont mesurées sur poudre de ciment anhydre conformément à la norme NA2595 [69]. La masse volumique absolue est mesurée à l'aide de densimètre Le Chatelier en utilisant l'Acétone comme solution inerte. La masse volumique absolue est mesurée avec l'équipement illustré dans la Figure 2.8, en utilisant la formule suivante :

$$P_{abs} = \frac{M1}{V2 - V1}$$

M₁ : Masse de l'échantillon de ciment

V₁ : Volume initial de l'Acétone

V₂ : Volume après l'introduction de l'échantillon de ciment.

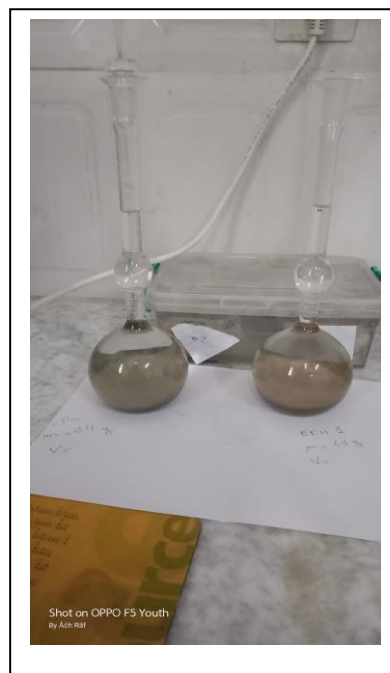


Figure 2.8 : Masse volumique absolue des ciments.

2.3.3.2. Masse volumique apparente des ciments anhydres

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3[70].

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport :

$$\rho = M / V \quad \text{g/cm}^3$$



Figure 2.9 : Masse volumique apparente des ciments anhydres.

2.3.3.3. Mesure de la surface spécifique de blaine (SSB) des ciments

La finesse de mouture de la poudre de ciment est mesurée à l'aide de la perméabili-mètre de Blaine représentée dans la Figure 2.10. Sa description complète et son principe de fonctionnement sont données par la norme EN 196-6 [71].



Figure 2.10 : Appareil de Blaine (SSB).

2.3.3.4. Essai de consistance normale des ciments

La consistance normalisée d'une pâte de ciment caractérise sa plus au moins grande fluidité. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir partir d'une même consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. Elle est nécessaire pour déterminer les temps de début et fin de prise ainsi que l'essai de stabilité. La variation de la consistance normale est déterminée conformément à la norme NA229 [72] à l'aide de l'appareil de Vicat qui se compose d'un moule tronconique de 40mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité par une sonde d'un diamètre $\varnothing = 10\text{mm}$. La partie coulissante a une masse de 300g (y compris la sonde amovible). Après avoir préparé la pâte pure de ciment, elle placée dans le moule. Lorsque la sonde s'arrête à une distance $d=6\pm 1\text{mm}$ de la plaque de base plane, la consistance est considérée comme consistance normale.



Figure 2.11 : Appareil de Vicat.

2.3.3.5. Essai de prise

Dans son principe, le temps de début de prise correspond à peu près au moment où la pâte cesse d'être mouillable et commence à se comporter comme un solide mécaniquement résistant. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. L'essai du temps de début et de fin de prise est réalisé suivant la norme NA230 [73] grâce à l'appareil de Vicat (Figure 2.12), dans une enceinte dont la température est maintenue à $24 \pm 3^\circ\text{C}$. L'on mesure l'enfoncement d'une aiguille de diamètre $\varnothing = 1,13\text{mm}$, fixée à la partie mobile de l'appareil de Vicat, dont la masse totale est de 300g, dans une pâte pure de ciment maintenue dans un moule tronconique de 40mm de hauteur. Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance $d = 4 \pm 1\text{mm}$ de la plaque de base plane, le temps de début de prise est enregistré. La fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau c'est-à-dire une transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide.



Figure 2.12 : Prisomètre (Vicat automatique).

2.3.3.6. Essai sur mortier normalisé

A. Masse volumique apparente des mortiers à l'état frais

La mesure de la masse volumique apparente à l'état frais des mortiers préparés est effectuée selon la norme NF EN 1015-6 [74]. Par remplissage d'un récipient de volume 1 litre par le mortier frais de chaque échantillon. La masse volumique à l'état frais (ρ_f) du mortier est donnée par la formule suivant :

$$\rho_f = \frac{M1 - M0}{V}$$

M_0 : masse du récipient vide.

M_1 : masse de l'échantillon plus récipient.

V : volume du récipient.



Figure 2.13 : Masse volumique apparente à l'état frais du mortier.

B. Tests d'étalement

L'essai d'étalement est utilisé pour comprendre le comportement des fines de brique et le verre et le laitier lors de leur mélange avec le ciment. La mesure des diamètres d'étalement des pâtes fraîches sur une surface plane permet le contrôle de la consistance et le suivi de la maniabilité des formulations.

L'essai d'étalement est basé sur la norme EN 1015-3 [75]. Il est réalisé à température ambiante, avec un malaxage pendant 10 min, puis un coulage de la pâte dans un cône standard (Figure 2.14) ayant un diamètre intérieur de 10 cm. Après le soulèvement du cône et l'étalement de la pâte, deux mesures sur deux diamètres perpendiculaires (d_1 et d_2) sont effectuées. La valeur d'étalement est donnée par la formule :

$$F = \frac{D1 - D2}{2}$$

avec $D1$ et $D2$ les deux diamètres perpendiculaires (en cm).



Figure 2.14 : Tests d'étalement.

Tableau 2.4 : Valeurs d'étalement NF EN 1015-3 [75].

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 mm
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm
Mortiers fluide	> 200 mm

C. Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme NBN B15-215 (2018) [76].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à un séchage des éprouvettes (4x4x16) cm³ du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 150°C. Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à 20±2°C durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0.1%. Une fois la masse saturée est obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion A_b est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_a : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de 3 valeurs mesurées.



Figure 2.15 : Etuve utilisée - Conservation des éprouvettes à l'eau potable.

D. Essai de Porosité accessible à l'eau (mesure hydrostatique)

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF EN18-459 (2010) [77]. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes (4x4x16) cm³ dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. L'essai comprend les étapes suivantes :

– Pesée hydrostatique

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision 0.01g) pour obtenir M_{eau} de l'éprouvette immergée dans l'eau.

– Pesée à l'air

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse M_{air} de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un mortier, l'essai est réalisé sur 3 échantillons.

– **Pesée à sec**

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05%. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche M_{sec} . On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau P :

$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})}$$



Figure 2.16 : Balance hydrostatique.

E. Etude de la porosité accessible à l'eau (ébullition ASTM C642)

Pour étudier la porosité accessible à l'eau des différents bétons formulés, nous avons utilisé deux méthodes : la première selon la norme Américaine ASTM C642 [78] et la deuxième selon la norme Européenne NF EN18-459 (2010) [77].

La norme Américaine ASTM C642 consiste à sécher l'échantillon à l'étuve à 105°C , jusqu'à masse constante M_1 en suite à l'émerger dans une casserole d'eau qui sera chauffée jusqu'à ébullition, et ce pendant 5 heures.

En fin les éprouvettes sont essuyées et pesées pour déterminer la masse M_2 . La porosité accessible à l'eau, exprimée en pourcentage, est définie alors comme :

$$P (\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_2)} \times 100.$$

Avec :

M_1 : masse de l'éprouvette après séchage.

M_2 : masse de l'éprouvette après ébullition



Figure 2.17 : Etude de la porosité accessible à l'eau selon la norme Américaine ASTM C642.

F. Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du mortier et béton. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité. Il est utilisé en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Conduite de l'essai

Après démoulage, les éprouvettes prismatiques de mortier (4×4×16) cm³ sont conservées jusqu'à l'âge de 28 jours dans l'eau (deux échantillon par composition). Les éprouvettes sont ensuite extraites de l'eau, puis conservées dans une étuve ventilée à 60°C. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier jusqu'à une masse constante. Les éprouvettes sont ensuite préalablement imperméabilisées par la résine sur les quatre faces latérales (4x16). Après le séchage complet de la résine, les éprouvettes sont posés

sur des petits supports (non absorbants) dans un bac à eau de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres de la surface (4x4) de l'éprouvette soient immergés dans l'eau afin d'obtenir un écoulement unidirectionnel, le bac d'eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau permet de maintenir le niveau d'eau constant tout le long de l'expérience. L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne EN 13057 (2002) [79] et consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps. Le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette. Puis on procède à de relevés de masse successifs à l'aide d'une balance de précision de 0,01g sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience (0 min, 4min, 9min, 16min, 25min, 36min, 49min, 1h, 2h, 3h, 4h, 8h, 24h.) À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient. Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré (g/mm²), par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_o}{S}$$

Avec :

M_o : masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en gramme.

M_j : masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

S : section de la base de l'éprouvette en millimètre carré, c'est-à-dire 1600mm².

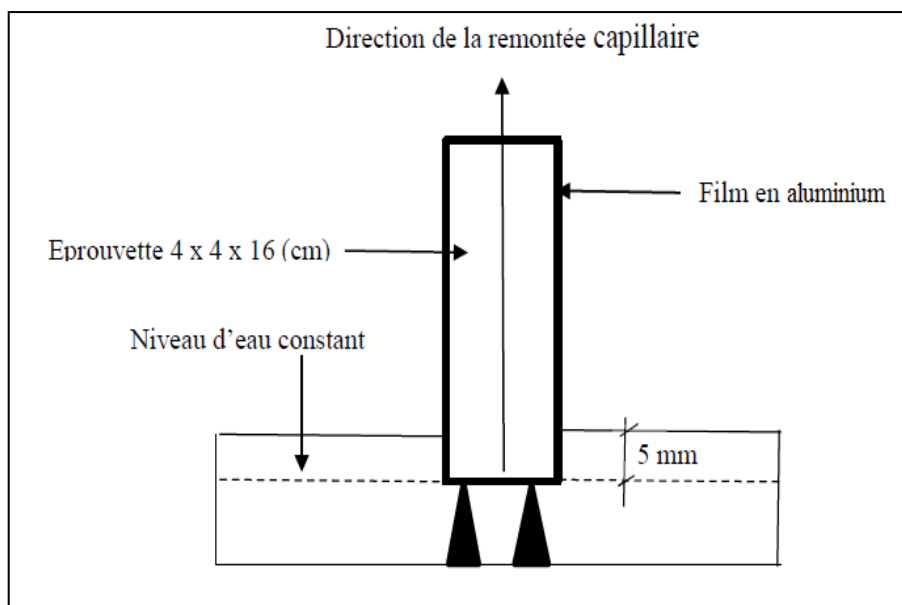


Figure 2.18 : Schéma du dispositif expérimental.



Figure 2.19 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.

G. Essai d'ultrasons

Pour les corps d'épreuve «support-mortier », les mesures des vitesses ultrasoniques ont été effectuées en mode indirecte, donc à l'aide des ondes de surfaces. Le transducteur émetteur sera placé en contact avec la surface du mortier en un point fixe et le transducteur récepteur sera déplacé en différents points alignés à des distances fixes et qui sont différents pour chaque type de support. La pente de la meilleure droite passant par les points sera mesurée et relevée comme vitesse conventionnelle de propagation. Cet essai est réalisé conformément à la spécification de la norme NA 5027 [80].



Figure 2.20 : Appareil à ultrasons utilisé.

Tableau2.5 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion.

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

2.3.4. Essais de caractérisations mécaniques

Les résistances à la compression et à la flexion ont été déterminées sur des éprouvettes de forme prismatiques (4.4.16) cm³ confectionnées sur mortier normal, conformément à la norme NA234 [81]. Le ciment et le sable normalisé sont gâches avec l'eau dont le rapport (E/C = 0,5). Le malaxage du mortier a été réalisé dans un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 litres selon les prescriptions de la norme NA234 [81]. Après moulage, les éprouvettes ont été compactées à l'aide d'une table vibrante. Les moules contenant les échantillons sont ensuite couvertes de film en plastique et placées dans la chambre humide à une température de 20 ± 1°C. Après 24 heures, les échantillons sont démoulés et conservés dans une atmosphère saturée dans la chambre humide pendant respectivement 28 et 60 jours. A l'âge d'essai, les éprouvettes sont soumises à l'écrasement par flexion en suite, les demi-éprouvettes obtenues sont soumises à l'essai de résistance à la compression. On signalera toutefois que la valeur obtenue pour chaque échantillon ciment est une moyenne de 3 essais.



Figure 2.21 : Appareil flexion-compression.

2.4. CONCLUSION

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et physique.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES CIMENTS ELABORES

CHAPITRE 3

Caractérisation des ciments élaborés

3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les résultats trouvés après une série des essais de caractérisation chimique, physique et mécanique seront exposés, discutés et comparés avec un échantillon de référence. Les essais réalisés ont été conduits conformément aux normes sur les ciments en vigueur en Algérie.

3.2. RESULTATS DES ESSAIS REALISES

Pour la préparation des échantillons du ciment, nous avons procédé à un broyage et à un tamisage séparé des matières premières (CEM I- 42.5- CPA, poudre de verre, poudre de brique et poudre de laitier de haut fourneau). Après dosage, les échantillons de ciment ainsi élaborés sont homogénéisés et soumis aux essais.

3.2.1. Composition chimique des déchets

La composition chimique de la brique, du verre et du laitier de haut fourneau utilisés déterminée par fluorescence X, est représenté dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique des déchets utilisés.

Matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	PAF
Brique	64.30	20.80	6.60	0.85	1.25	0.10	1.94	0.23	0.028	1.96
Verre	58.94	0.94	0.02	8.26	2.81	0.07	0.51	14.01		1.00
Laitier	37.50	8.39	0.79	43.11	3.41	0.36	0.92	0.14		0.20

On constate d'après le Tableau 3.1 que les différents déchets choisis ne présentent pas la même composition chimique.

On remarque aussi que la brique et le verre contiennent une quantité importante de silice et des teneurs faibles de chaux par rapport au laitier. La brique contient plus d'alumine suivie par le laitier et en fin le verre. La teneur d'alumine dans le verre ne dépasse pas 1% tandis qu'il contient un pourcentage élevé de Na₂O, ce qui nous oblige de suivre son pourcentage dans le ciment.

Pour être utilisé comme, constituant secondaire actif, dans l'industrie du ciment, la poudre de briques doit répondre à certains critères chimiques. Ainsi et selon la norme Américaine STM-C-618 (2018) [52], les minéraux provenant de l'argile cuite doivent répondre aux trois conditions suivantes :

- 1) La somme totale des trois oxydes ($\% \text{SiO}_2$) + ($\% \text{Al}_2\text{O}_3$) + ($\% \text{Fe}_2\text{O}_3$) supérieure à 70%,
- 2) Le taux de dioxyde de sulfure inférieur à 4%,
- 3) La perte au feu inférieur 10%.

Si les trois conditions citées précédemment sont vérifiées, le matériau sera déclaré «pozzolanique actif».

En accordance avec les trois critères de la norme ASTM-C-618 (2018), les déchets de briques utilisés correspondent bien à un matériau pouzzolanique actif pour le béton. En effet :

- ❖ $(\% \text{SiO}_2) + (\% \text{Al}_2\text{O}_3) + (\% \text{Fe}_2\text{O}_3) = 64.30 + 20.80 + 6.60 = 91.70 \% > 70\%$
- ❖ $(\% \text{SO}_3) = 0.10 < 4\%$
- ❖ **P.A.F = 1.96 < 10%.**

Concernant le laitier de haut fourneau, il doit contenir une teneur en chaux (CaO) aussi forte que possible, qui favorise la prise. Une teneur en alumine (Al_2O_3) élevée est parfois recherchée parce qu'elle améliore la résistance initiale. Ces deux conditions sont vérifiées dans notre laitier, alors que l'effet de la teneur en MgO est a discuté dans le mélange du ciment.

Comme déjà mentionné dans la partie deux du chapitre 1, paragraphe 1.16.5, l'activité hydraulique du laitier croit avec l'augmentation des deux modules : le module de basicité et le module d'acidité. Plus le module d'acidité est grand plus la vitesse de durcissement du laitier broyé est rapide [62].

$$\text{Module de basicité : } M_b = \frac{\%C_aO + \%MgO}{\%S_iO_2 + \%Al_2O_3} ; M_b = 1.01 > 1 \quad \text{Laitier est basique.}$$

$$\text{Module d'acidité : } M_a = \frac{\%Al_2O_3}{\%S_iO_2} ; M_a = 0.22 \quad \text{Laitier basique.}$$

3.2.2. Caractérisation des ciments élaborés

Après broyage séparé des déchets, tamisage, dosage et homogénéisation, nous avons élaborés dix échantillons de ciment. Ces derniers seront caractérisés chimiquement, physiquement et

mécaniquement. Les résultats ainsi trouvés seront comparés avec ceux d'un échantillon de référence CPA CEM I/42.5. Le détail des mélanges obtenus est illustré dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Désignation et dosage des ciments élaborés.

Ciment	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
CPA (%)	100	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Laitier (%)	0	7.5	8.33	5	7.5	5	5	10	5.83	5.83	6.67
Brique (%)	0	7.5	5.83	7.5	5	10	5	5	8.33	5.83	6.67
Verre (%)	0	5	5.83	7.5	7.5	5	10	5	5.83	8.33	6.67

3.2.2.1. Caractérisation chimique

A) Composition chimique des ciments élaborés

La détermination des constituants chimiques des ciments a été faite :

A.1) Par fluorescence X.

Les résultats de cette analyse sont reportés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse).

Echantillons	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
EC0	20.16	5.58	3.19	64.24	1.39	1.75	0.39	0.10	0.003
EC1	28.64	6.11	3.35	57.99	1.69	1.39	0.51	0.61	0.005
EC2	27.97	5.95	3.13	57.94	1.71	1.38	0.48	0.63	0.006
EC3	29.64	5.68	3.34	57.15	1.67	1.38	0.50	0.82	0.011
EC4	27.85	5.42	3.13	57.66	1.68	1.48	0.47	0.79	0.005
EC5	28.61	6.35	3.42	55.95	1.59	1.44	0.55	0.72	0.057
EC6	29.23	5.13	3.12	56.99	1.73	1.47	0.46	1.07	0.006
EC7	27.14	5.73	3.08	58.04	1.68	1.52	0.48	0.66	0.010
EC8	28.63	6.04	3.32	56.95	1.64	1.45	0.51	0.68	0.007
EC9	28.65	5.98	3.34	57.73	1.67	1.52	0.49	0.67	0.006
EC10	27.76	6.34	3.32	56.97	1.68	1.47	0.49	0.61	0.005

D’après le Tableau 3.3, on constate que les nouveaux ciments présentent une composition chimique très proche pour l’ensemble des oxydes. On constate aussi, que l’ensembles des ciments composés contiennent un pourcentage plus élevé en silice et un pourcentage plus faible en chaux. Cette différence est due essentiellement aux teneurs de ces oxyde dans les poudres ajoutées.

A.2) Teneur en (CaO) libre et en perte au feu (PAF)

Les mesures expérimentales de la teneur en CaO libre des ciments élaborés sont reportées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Teneur en (CaO) libre déterminée par l’alcool glycérol.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
CaO libre (%)	0.15	0.13	0.13	0.13	0.10	0.23	0.25	0.23	0.20	0.13	0.18
PAF	3.02	3.01	2.90	2.81	2.70	3.00	2.98	2.60	2.92	2.95	2.95

La teneur en chaux libre et la perte au feu dans l’ensemble des ciments élaborés sont très proches et reste toujours dans l’intervalle préconisé par la norme NA442 [64].

B) Indice d’hydraulicité

L’indice d’hydraulicité ou indice de Vicat est définit comme étant le rapport de la fraction acide à la fraction basique du ciment. Le calcul des différents modules hydrauliques est groupé dans le Tableau 3.5.

$$I = \left\{ \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} \right\} = \left\{ \frac{\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} - \text{MgO}} \right\}$$

Tableau 3.5 : Indice d’hydraulicité des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
$I = \frac{\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} - \text{MgO}}$	0.23	0.40	0.39	0.43	0.40	0.41	0.44	0.38	0.41	0.40	0.39

Pour classer les ciments selon leur résistance chimique, on doit calculer les valeurs de l’indice d’hydraulicité. Ainsi on distingue [4] :

- les ciments basiques (ce sont généralement les ciments portland), pour lesquels $I \leq 0.5$.
- les ciments neutres (riches en laitier) pour lesquels $I > 0.5$.
- les ciments acides pour lesquels $I = 1$.

A partir de la classification citée précédemment, on peut conclure que tous les ciments préparés peuvent être classés comme des ciments basiques ($I \leq 0.5$).

3.2.2.2. Caractérisation physique

A) Masses volumiques des ciments : Les mesures expérimentales des masses volumiques des ciments élaborés sont reportées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Masses volumiques des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
M.V apparente (g/cm³)	1071.1	1057.1	1055.5	1041.3	1036.5	1062.9	1034.1	1054.4	996.3	975.4	1013.3
M.V absolue (g/cm³)	3.17	3.06	3.09	3.00	3.08	2.96	3.08	3.11	3.09	3.09	2.98

On observe d'après le Tableau 3.6 que les ciments composés présentent des masses volumique inférieures à celles enregistré par l'échantillon de référence. Ce comportement peut être expliquer par le fait les masses volumiques des poudres de déchets utilisées sont inférieurs aux celles de l'échantillon de référence [4, 8].

B) Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante). Les mesures de la Surface Spécifique de Blaine des ciments élaborés réalisées selon la norme NF EN 196-6 [71] sont regroupées dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés.

Echantillons	EC 0	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6	EC 7	EC 8	EC 9	EC 10
SSB (cm²/g)	3470	3170	3164	3109	3350	3416	3252	3348	3236	3298	3154

La différence enregistrée dans la finesse des ciments élaborés est due essentiellement au type de broyage adapté (broyage séparé des constituants). Les ajouts ne présentent pas la même aptitude au broyage [4].

C) Essai de consistance normale des ciments

L'essai de consistance normale a été réalisé selon la norme NA 229 [72]. La consistance normalisée d'une pâte de ciment est nécessaire pour déterminer les temps de début et de fin de prise. Le Tableau 3.8 représente la variation de la demande en eau pour les différents échantillons de ciment en fonction de la teneur en ajouts.

Tableau 3.8 : Consistance normale des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
Consistance(%)	26.60	26.80	25.60	26.80	25.60	27.00	25.30	25.40	25.00	26.00	26.4

D'après le Tableau 3.8, le rapport (E/C) de la consistance normale augmente de 25.00 à 27.00 %. On remarque que les échantillons riches en verre nécessitent des quantités d'eau moins que les autres échantillons et que la poudre de brique absorbe une quantité d'eau plus importante.

D) Temps de prise

Le temps de prise d'un ciment dépend de plusieurs facteurs, notamment de la concentration de la solution alcaline, du temps de malaxage, de la vitesse de dissolution de la silice et de l'alumine, du rapport massique E/C, de la température de traitement et de la cristallinité du matériau aluminosilicate.

La détermination du temps de début et de fin de prise est effectuée sur des pâtes fraîches de ciment maintenues à la température ambiante du laboratoire ($21 \pm 1^\circ\text{C}$). Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Temps de prise des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
T. de début de prise (min)	217	218	219	212	226	212	216	204	215	216	218
T. de fin de prise (min)	282	284	330	313	301	272	293	295	319	295	304

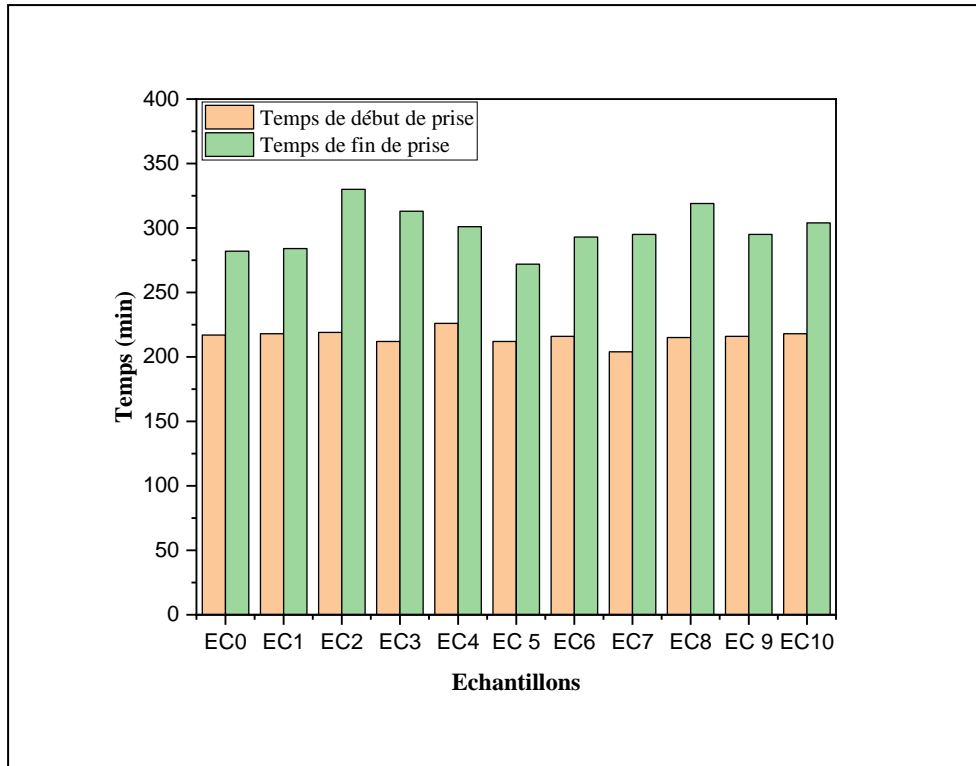


Figure 3.1 : Résultats de temps de prise des ciments élaborés.

D'après le Tableau 3.9 et la Figure 3.1, on remarque que la plupart des échantillons ont enregistré des temps de début de prise très proches. Tandis que le temps de fin de prise varie d'un échantillon à un autre. On remarque aussi que les échantillons EC2, EC3 et EC8 ont enregistré des temps de fin de prise les plus longs. La différence entre le temps de début et celui de fin de prise varie de 60 min et 110 min mais les valeurs trouvées sont dans l'intervalle préconisé par la norme en vigueur NA 442 [64] qui est estimée supérieur ou égale à 75 min. Il semble que la contribution de la poudre de brique est plus importante que la poudre de verre et celle du laitier dans l'accélération du temps de prise (272 min contre 293, et 295 min) respectivement.

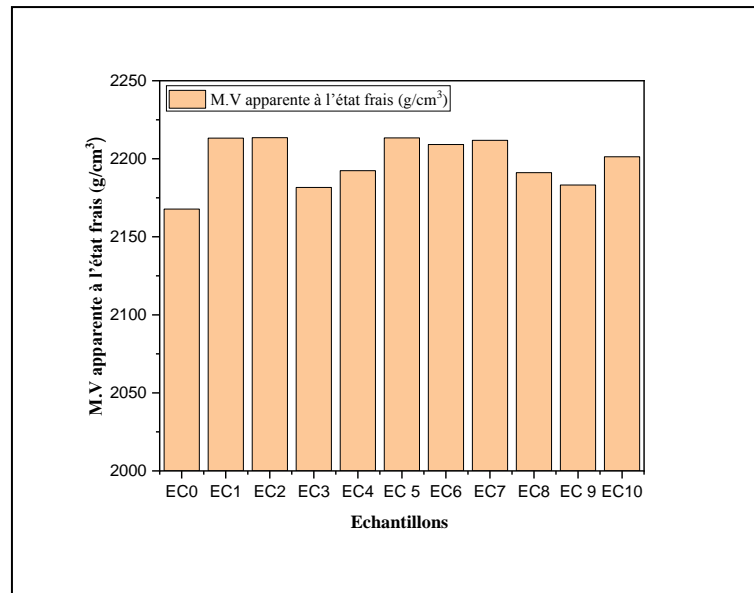
E) Essai sur mortier normalisé

E.1) Masse volumique apparente des mortiers à l'état frais

La mesure de la masse volumique apparente des mortiers normalisés confectionnés selon la norme EN 196-1 [65] à l'état frais a été réalisée selon la norme NF EN 1015-6 [74]. Les résultats ainsi obtenus sont regroupés dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Masse volumique apparente des mortiers normalisés à l'état frais.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
M.V absolue à l'état frais (g/cm ³)	2337.0	2213.2	2213.5	2181.6	2192.4	2213.4	2209.1	2211.8	2191.1	2183.2	2201.3

**Figure 3.2** : Masses volumiques des mortiers de ciments préparés à l'état frais.

On constate d'après la Figure 3.2 que la masse volumique apparente des mortiers élaborés avec les nouveaux ciments sont plus faibles que celles de l'échantillon de référence, ce qui peut être expliqué par le fait que les ajouts utilisés présentent des masses volumiques plus faible que celle du ciment CPA CEMI. Ces résultats sont en accord avec les résultats de l'essai de mesure des masses volumiques des poudres de ciments préparées.

E.2) Tests d'étalement

L'essai d'étalement a été réalisé selon la norme EN 1015-3 [75]. Cet essai permet d'évaluer la maniabilité des mortiers normalisés préparés avec les nouveaux ciments. Les mesures de cet essai sont reportées dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Test d'étalement des mortiers normalisés de ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
D1 (cm)	20.7	22.6	21.4	22.1	22.3	20.5	22.6	21.6	22.1	20.6	21.5
D2 (cm)	21.0	22.3	21.7	21.8	21.6	21.0	22.3	21.5	21.7	20.4	21.6
$F = \frac{D1+D2}{2}$ (cm)	20.8	22.4	21.5	21.9	21.9	20.7	22.4	21.5	21.9	20.5	21.5

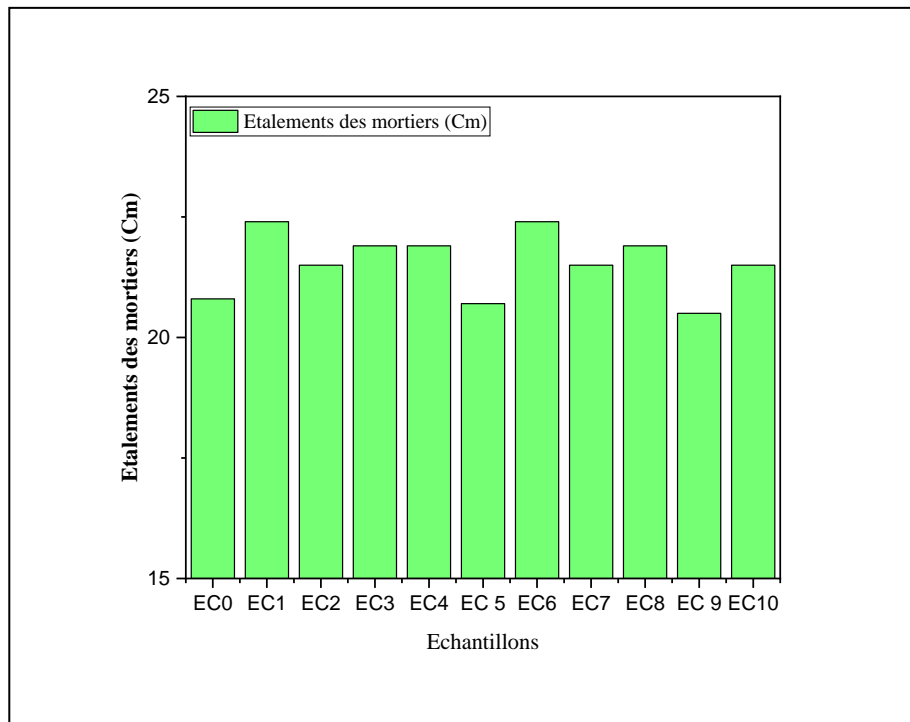


Figure 3.3 : Résultats de test d'étalement des mortiers normalisés de ciments élaborés.

D'après les histogrammes de la Figure 3.3, il semble que l'étalement des mortiers préparés varie d'une manière aléatoire, et pour bien comprendre l'effet de l'ajout sur le comportement des mortiers, on compare l'étalement mesuré des échantillons EC5, EC6 et EC7 qui contiennent respectivement 10% de brique, 10% verre et 10% de laitier. On constate que la poudre de verre absorbe peut ou pas de l'eau de gâchage et que le laitier absorbe une quantité moindre que la brique. D'après la norme NF EN 1015-6 [75], l'ensemble des mortiers préparés sont des mortiers fluides $D > 200$ mm.

E.3) Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion totale d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme NBN B 15.215(2018) [76]. Après conservation dans l'eau pendant 28 jours, les éprouvettes sont extraites de l'eau. Après leurs séchages jusqu'à masse constante puis leurs émergements dans l'eau pendant 48 h. Le détail des résultats est illustré dans le Tableau 3.12,

Tableau 3.12 : Résultats d'absorption d'eau par immersion totale (28 J).

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
M_{seche} (g)	562.9	547.4	542.8	540.6	554.7	549.8	549.4	551.7	545.5	547.2	547.7
M_0 (g)	597.5	565.8	563.2	562.5	573.3	572.5	566.9	575.2	569.9	570.7	570.9
A_b (%)	6.15	4.36	3.75	4.05	3.35	4.13	3.19	4.26	4.47	4.29	4.24

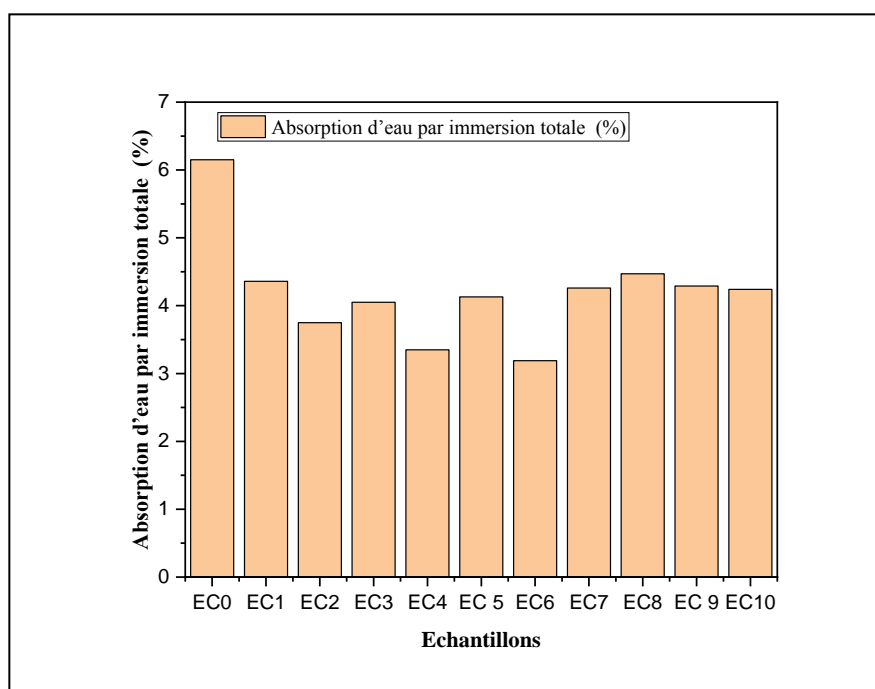


Figure 3.4 : Résultats d'absorption d'eau par immersion totale (28 J).

A l'âge de 28 jours, l'ensemble des mortiers préparés à base de nouveaux ciments absorbent moins d'eau que l'échantillon de référence. Ce qui présente un avantage de leur valorisation dans le béton et le ciment en termes de durabilité. Ce gain de compacité est dû essentiellement à l'affinage des pores suite au développement de la réaction pouzzolanique des ajouts. L'ordre de la capacité de l'absorption d'eau par les ciments est comme suit : Ciment CPA CEMI > Ciment au laitier > Ciment à la brique > Ciment au verre.

E.4) Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée en utilisant deux méthodes : la première est basée sur les pesées hydrostatiques selon la Norme NF EN18-459 (2010) [77] et la deuxième (ébullition) selon la norme ASTM C-642 [78].

. Les résultats de l'essai de mesure de la porosité accessible à l'eau des mortiers normalisés contenant différents pourcentages d'ajouts : poudre de verre, de la brique et du laitier de haut fourneau sont illustrés dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.13 : Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés en (%).

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC 9	EC10
M_{eau} (g)	332.6	315.2	314.1	311.4	319.7	318.6	313.5	320.9	317.1	318.8	318.3
M_{air} (g)	597.5	565.8	563.2	562.5	573.3	572.5	566.9	575.2	569.9	570.7	570.9
M_{seche} (g)	562.9	547.4	542.8	540.6	554.7	549.8	549.4	551.7	545.5	547.2	547.7
P (%) (hydrostatique)	0.130	0.073	0.082	0.087	0.073	0.089	0.069	0.092	0.096	0.093	0.092
M_E (g)	588.4	555.5	555.7	555.5	566.5	560.1	554.4	563.7	559.3	560.9	560.9
P (%) Ebullition	4.33	1.46	2.32	2.68	2.08	1.84	0.90	2.13	2.47	2.44	2.35

Concernant la porosité accessible à l'eau déterminée selon les deux méthodes pesées hydrostatiques et la méthode d'ébullition, Les résultats trouvés montrent clairement que :

- L'échantillon de référence est plus poreux que ceux préparés avec les nouveaux ciments.
- La comparaison de la porosité des échantillons de ciment renfermant les ajouts montre que :

* les ciments contenant la poudre de verre sont moins poreux par rapport aux autres ciments.

* La porosité par mesurée par les deux méthodes sont en accordance.

E.5) Absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé après une conservation des éprouvettes sous l'eau pendant 28 jours et pour évaluer l'effet pouzzolanique des poudres ajoutées, on a refait l'essai après 60 jours de conservation. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 3.14.

Tableau 3.14: Absorption capillaire des mortiers de ciments élaborés après 28 et 60 jours.

ECH	Agés	0-4 Min	0-9 min	0-16 Min	0-25 Min	0-36 min	0-49 Min	0-60 Min	0-2 h	0-3 h	0-4 H	0-8 h	0-24 h
E0	28 J	0.0006	0.0007	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.007
	60 J	0.0003	0.0004	0.0006	0.0006	0.0008	0.0008	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
E1	28 J	0.0005	0.0007	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.008
	60 J	0.0001	0.0002	0.0003	0.0003	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0008	0.0008	0.001	0.002
E2	28 J	0.0006	0.0008	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.005	0.007
	60 J	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.002
E3	28 J	0.0006	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.005	0.005	0.007	0.011
	60 J	0.0003	0.0005	0.0006	0.0008	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
E4	28 J	0.0005	0.0008	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
	60 J	0.0004	0.0006	0.0008	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005
E5	28 J	0.0003	0.0006	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004
	60 J	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
E6	28 J	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.006
	60 J	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0008	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
E7	28 J	0.0006	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005
	60 J	0.0003	0.0005	0.0007	0.0008	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003
E8	28 J	0.0004	0.0006	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.005
	60 J	0.0002	0.0005	0.0007	0.0008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
E9	28 J	0.0006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.007
	60 J	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
E10	28 J	0.0005	0.0007	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.005
	60 J	0.0002	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.002

D'après le Tableau 3.14, en générale l'absorption capillaire mesurée à l'âge de 60 jours de l'ensemble des ciments élaborés sont inférieurs aux valeurs mesurées à l'âge de 28 jours. Ce

comportement est justifié par la continuité des réactions d'hydratation des ciments dans le temps ainsi que de la réactivité des ajouts utilisés qui favorise l'affinage des pores.

E.6) Vitesses ultrasoniques

La mesure de la vitesse d'impulsion du son permet d'avoir une idée sur la compacité du matériau étudié. La norme NA 5027[80], décrit la manipulation de cet essai.

L'ensemble des résultats des vitesses de propagation des impulsions ultrasoniques appliquées sur les mortiers à l'âge de 28 jours est illustré dans le Tableau 3.15.

Tableau 3.15 : Vitesses ultrasoniques des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
Vitesses du son (m/s)	3855	3720	3764	3686	3911	3960	3800	3940	3931	3970	3950

La vitesse de propagation diffère d'un échantillon à un autre. Plus la vitesse augmente plus la qualité du béton augmente. D'après le Tableau 3.15, l'ensemble des vitesses du son enregistrées sont dans l'intervalle 3686 et 3970 m/s. Ainsi selon la norme NA 5027, les mortiers formulés sont classés comme des mortiers de bonne qualité (3500-4500 m/s).

3.2.2.3. Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique dans ce travail consiste à la mesure de la résistance à la compression et celle à la traction par flexion 3 point. L'essai a été effectué sur des éprouvettes prismatiques de $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ en mortier normal selon la norme NA 234 [81], Les éprouvettes ont été conservées sous l'eau pendant 28 et 60 jours à la température du laboratoire. Les résultats d'essai d'écrasement en compression et en flexion sont regroupés dans le Tableau 3.16.

Tableau 3.16 : Résistance mécanique à la compression et à la flexion des ciments

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10
R. compression à 28 jours (MPa)	40.57	32.53	35.50	33.39	33.12	36.35	32.62	37.36	32.91	37.21	33.20
R. compression à 60 jours (MPa)	52.40	45.72	45.47	43.66	46.85	44.26	44.30	48.82	49.03	46.66	45.19
R. à la flexion à 60 jours (MPa)	7.47	7.44	8.00	6.95	6.36	6.94	6.58	7.27	6.43	7.12	7.56

A) Résistance mécanique à la compression

Le but de cet essai est de déterminer la classe de résistance des ciments élaborés.

- A l'âge de 28 jours, on a observé que les échantillons EC2, EC5, EC7 et EC9 ont enregistré des résistances très proches dont la moyenne est autour de 36 MPa, alors que les échantillons EC1, EC3, EC4, EC6, EC8 et EC10 ont enregistré une moyenne d'environ 33 MPa. Ces derniers présentent des résistances plus faibles que les échantillons EC2, EC5, EC7 et EC9.

- A l'âge de 60 jours, on a enregistré un gain moyen de résistance d'environ 11 MPa entre 28 et 60 jours. L'échantillon E7 et E8 ont donné des valeurs de résistance plus grandes que les autres échantillons de ciments composés.

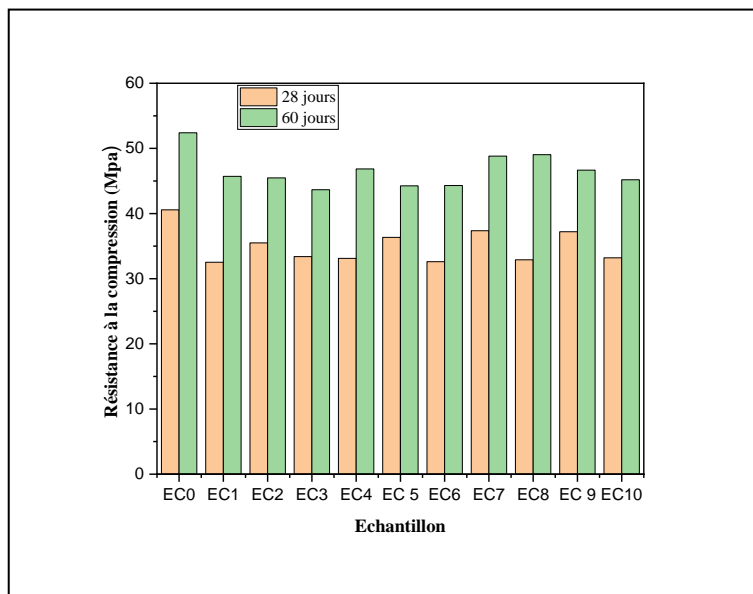


Figure 3.5 : Résultat de la Résistance mécanique à la compression à 28 et 60 jours.

B) Résistance mécanique à la flexion

Concernant la résistance à la flexion, on a observé les mêmes remarques que celles de la résistance à la compression.

Finalement les échantillons des nouveaux ciments présentent des résistances plus faibles que celles de l'échantillon de référence à l'âge de 60 jours. Ce gain de résistance s'explique par l'effet pouzzolanique ainsi que l'effet filler des ajouts utilisés.

3.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a exposé tous les résultats des essais réalisés qui visent à caractériser les nouveaux ciments. Le Tableau 3.17 résume les principaux résultats trouvés. Ces derniers seront accompagnés avec les valeurs préconisées par la norme NA442 [64] caractérisant un ciment composé CPJ CEMII/A de classe 32.5.

Tableau 3.17 : Caractéristiques des ciments élaborés

Echantillons	NA 442	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC 5	EC6	EC7	EC8	EC 9	EC10
R. compression 28 j (MPa)	≥ 32.5	40.57	32.53	35.50	33.39	33.12	36.35	32.62	37.36	32.91	37.21	33.20
R. flexion à 28 jours (MPa)	--	3.538	2.749	2.997	2.692	2.964	3.113	2.915	3.041	2.923	3.142	2.838
M. volumique (g/cm³)	--	3.17	3.06	3.09	3.00	3.08	2.96	3.08	3.11	3.09	3.09	2.98
SSB (cm²/g)	--	2708	3170	3164	3109	3350	3416	3252	3348	3236	3298	3154
SO₃ (%)	≤ 3.5	1.75	1.39	1.38	1.38	1.48	1.44	1.47	1.52	1.45	1.52	1.47
(P.A.F) (%)	--	3.02	3.01	2.90	2.81	2.70	3.00	2.98	2.60	2.92	2.95	2.95
T. début de prise (min)	≥ 75	217	218	219	212	226	212	216	204	215	216	218
Cl⁻ (%)	≤ 0.10	0.003	0.005	0.006	0.0011	0.005	0.057	0.006	0.010	0.007	0.006	0.005

CONCLUSIONS GENERALES

Conclusions générales

La valorisation de sous-produits industriels et déchets, dont notamment les déchets de briques, du laitier et du verre permet de résoudre beaucoup de problèmes liés à l'industrie cimentaire.

De point de vue écologique et environnemental, la production d'une tonne de ciment portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). L'utilisation des ajouts cimentaires permet ainsi de préserver les ressources naturelles non renouvelables nécessaires à la production du clinker (argile, calcaire et combustibles fossiles).

De point de vue technologique, les ciments fabriqués avec ajouts présentent des performances comparables avec ceux du ciment portland.

De point de vue économique, les ciments avec ajouts sont moins chers que le ciment portland, ce qui rend le béton moins coûteux.

L'objectif de ce travail de recherche est de faire une étude rhéologique qui sera précédée d'une étude de la possibilité de fabriquer des nouveaux ciments composés obtenus par substitution partielle du clinker jusqu'à 20% par des poudres issues du broyage des déchets industriels à savoir : déchet de brique, déchet du laitier et en fin déchet du verre pour la fabrication d'un ciment CPJ CEM II/A.

Après une série d'essais de caractérisation rhéologique, chimique, physique (à l'état durci) et mécanique référencier selon les normes Algériennes sur les liants hydrauliques, nous avons tiré les conclusions suivantes :

1. les ciments composés présentent des masses volumiques inférieures à celles enregistré par l'échantillon de référence. Le même constat a été remarqué dans le cas des masses volumiques apparentes des mortiers frais élaborés avec les nouveaux ciments, ce qui peut être considéré un avantage pour les structures lourdes.
2. La plupart des échantillons ont enregistré des temps de début de prise très proches. Tandis que le temps de fin de prise vari d'un échantillon à un autre. Il semble que la contribution de la poudre de brique est plus importante que la poudre de verre et celle du laitier dans l'accélération du temps de prise.

3. La poudre de brique absorbe une quantité plus importante d'eau de gâchage que la poudre de laitier et que ce dernier absorbe une quantité plus que la poudre le verre.

4. L'échantillon de référence est plus poreux que ceux préparés avec les nouveaux ciments ainsi la comparaison de la porosité des échantillons de ciment renfermant les ajouts montre que les ciments contenant la poudre de verre sont moins poreux par rapport aux autres ciments.

5. Due essentiellement à la grande finesse de la poudre de brique, la demande en eau pour la consistance normale des pâtes de ciment a légèrement augmentée par rapport à celui des autres pâtes.

6. L'ensemble des mortiers formulés sont classés comme des mortiers de bonne qualité (vitesse ultrasonique entre 3686 et 3970 m/s) selon la norme NA 5027.

7. Un gain de résistance à la compression et à la flexion est observé à l'âge de 60 jours pour les ciments composés. Ce gain est dû à la formation prolongée du gel C-S-H secondaire formé par la réaction de la silice amorphe contenu dans Les ajouts avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ issue de l'hydratation du clinker et c'est prévu que ce gain augmente au cours du temps. Cependant, les ajouts utilisés ne confèrent pas aux mortiers ainsi élaborés de bonnes résistances à moyen terme (aucun gain de résistance n'est observé à l'âge de 28 jours) vue le démarrage retardé de la réaction pouzzolanique (démarrage entre 7 et 28 jours).

Réglementairement, toutes les exigences de la Norme Algérienne NA 442 (2013) qui traite les liants hydrauliques ont été vérifiés pour l'ensemble des ciments élaborés pour une classe de résistance de 32.5. Enfin la substitution de 20% de clinker par les déchets contribue à la préservation de l'environnement. En effet, nous estimations montrent que l'émission de CO_2 est réduite de 18% par rapport à un ciment sans ajout.

Finalement, la composition optimale proposée pour l'élaboration du nouveau ciment composé doit contenir les proportions, en masses suivantes :

- ✚ 75 % de clinker,
- ✚ 20 % d'ajout : 5% de brique, 7.5% de verre, 7.5% de laitier,
- ✚ 5 % de gypse.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Yahia, M. Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie, 2016.
- [2]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>.
- [3]. <https://www.infociments.fr/glossaire/clinker>.
- [4]. Nigri G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2018.
- [5]. Baron J., Sauterey R., Le béton hydraulique, connaissance et pratique, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1982.
- [6]. <https://www.infociments.fr/la-fumee-de-silice-laddition-incontournable-pour-des-betons-durables>.
- [7]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/12795119.1999.9692234>.
- [8]. Sayoud A. Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre, Mémoire de master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2021.
- [9]. <https://www.acpresse.fr/les-cendres-volantes/>.
- [10]. Pierre Claude A. Bétons haute performance, Édition Eyrolles, 2001.
- [11]. <http://pravarini.free.fr/CaSO4.htm>.
- [12]. NF EN (12620) Critères de qualité pour les granulats à béton.
- [13]. https://www.linkedin.com/pulse/quest-ce-que-les-fillers-calcaires-apportent-aub%C3%A9ton-/?trk=organization-update-content_share-article.
- [14]. Dr. NIGRI Ghania, cours Technologie du béton, Université 8 Mai 1945 de Guelma, p 23, 2020.
- [15]. Nigri G. Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment, Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2005.
- [16]. Meziani S, Yousfi N, l'évaluation d'impact de l'industrie du ciment sur l'environnement a l'aide de l'analyse de cycle de vie (acv) : cas de la cimenterie de hdjar-soud (schs) a skikda, Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [17]. Fatouhi A, Le ciment et les ajouts cimentaire, Mémoire de fin d'étude, Université ziane achour de djelfa, 2011.
- [18]. Sahri M, Elagoune M, Caractérisation d'un liant hydraulique à base de la poudre de verre -Etat de l'art-, Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2020.
- [19]. <http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>.

- [20]. David Lozach « Les constituants de béton et de mortier » collection cimbéton G10, 2005.
- [21]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/la-cuisson>.
- [22]. Mellouk.Med.A et Aouali Med A. Le broyeur, Mémoire de Master, Université Saad dahlab1, Blida, Algérie.
- [23]. Rédadaa F, Mahamdi S. Caractérisation physiques et de durabilité des ciments composées a base de brique, Mémoire de master, Université8 Mai 1945 de Guelma, Algérie ,2018.
- [24].<https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2225#:~:text=CIMENT%20%2D%20pouzzolanique%20ou%20aux%20pouzzolanes%20%2D%20n.m.%20%3A&text=Ayant%20une%20bonne%20r%C3%A9sistance%20m%C3%A9canique,maritimes%20et%20aux%20ouvrages%20%3A9tanches>.
- [25]. S. N. Gosh, Advances in cement technology, Pergaman Press Ltd, 1983.
- [26]. L. E. Copeland et Kantro D. L., "Hydratation of Portland cement" 5th. Int. Symp. Chem. Ceme., Tokyo. 1968, VII p.387
- [27]. A. Bentur, " Effect of gypsum on the hydration and strength of C3S pastes", J. Am. Ceram. Soc., 59(5), 210 (1976)
- [28]. K. Fuji, W. Kondo, Roc. 5th. Int. Symp. On Chem. Cem., V II, p. 362, Tokyo, 1968
- [29]. M. Regourd, "L'hydratation du ciment portland", dans "Le béton hydraulique", Paris Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1982.
- [30]. Goto T., Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex. Thèse de doctorat, L'université paris vi - pierre et marie curie, Paris vi, France, 2006.
- [31]. Bordy.A, « Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaires à base d'une fine recyclée», thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2016.
- [32]. R. H. Bogue, La chimie du ciment portland, Ed. Eyrolles, Paris, 1952.
- [33]. Ragoug.R, «Attaque sulfatique externe des matériaux cimentaires : Impacts de différents facteurs âge, composition du liant, présence chlorures», thèse de doctorat, Université de Paris- Est, 2016.
- [34]. Trauchessec.R, «Mélanges de ciment sulfo-alumineux et Portland», thèse de doctorat,

Université de Lorraine, 2013.

[35]. NOUI S, " L'influence des granulats artificiels « laitier » sur la résistance mécanique du béton ". Mémoire de master. Département de Génie Civil, université de M'Sila, 2017.

[36]. CHAABANE. L, Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les matrices cimentaires. Thèse doctorat, génie chimique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2018-2019.

[37]. Kateb.Med.L., Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architectural «cas des briques en bétons», Mémoire de maitrise ès sciences appliquées Université de Sherbrooke, Canada, 2009.

[38]. Slimani.H., Elaboration, mesure mécaniques et élastiques Des verres $Sb_2O_3-Li_2O-MoO_3 (WO_3)$, Mémoire de Master, Med Khider, Biskra, Algérie, 2014.

[39]. Malika.N., Effet des oxydes alcalino- terreux et les métaux de transitions sur les propriétés physiques des verres d'oxydes basés sur Sb_2O_3 , Med.Khider, Biskra, Algérie, 2012.

[40]. Concrete with waste aggregates : e_ect of aggregates type and role of composition, Mamery Serifou 2014, 191 Page ; Designer sur : https://tel.archivesouvertes.fr/file/index/docid/962148/filename/SERIFOU_MAMERY_2013.pdf.

[41]. Izemmouren.O., Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, Thèse de doctorat, Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2016.

[42]. Idir.R., Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, Thèse de doctorat Cotutelle, Université de Toulouse (France) et Université Sherbrooke, Canada, 2009.

[43]. Shi.C et Wu.Y., Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrète containing glass powder, ACI materials journal, 2005.

[44]. Shayan.A ET Xu., Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete a field trial on concrète slabs, Cernent and concrète research, 2006.

[45]. Shayan, A et Xu., Value-added utilisation of waste glass in concrète Cernent and concrete research, 2004.

[46]. Nano technologie, L'histoire d'une réussite, Nano Québec, 1 Page ; Designer sur : https://www.nanoquebec.ca/media/hrf1004-3_wbeton.pdf.

[47]. Raid Farid Alsobihi, Ben Yahia Abdesalam, « Influence de la substitution du clinker par l'argile cuite sur le comportement mécanique du mortier ». Mémoire de master, université de M'sila, juin, 2016.

[48]. FRACHEBOURG J .Contribution à l'étude de quelques pouzzolanes naturelles et Artificielles en vue de la fabrication des ciments de pouzzolanes. Thèse Lausanne .1965, p134.

- [49]. M. Chen, J. Lin, S. Wu, and C. Liu, "Utilisation of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1532–1536, Apr. 2011, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005.
- [50]. S. Wild, A. Gailius, H. Hansen, L. Pederson, and J. Szwabowski, "Pozzolanic properties of a variety of European clay bricks," *Build. Res. Inf.*, vol. 25, no. 3, pp. 170–175, May 1997, doi : 10.1080/096132197370435.
- [51]. <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/601339/brique>.
- [52]. ASTM C-618, "Standard spécification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete," 2018.
- [53]. M. Cyr, "Les fines minérales dans les matrices cimentaires," Thèse HdR, Université de Toulouse, 2019, p158.
- [54]. Adèle Grellier, Des fines de brique de terre cuite comme liants de substitution dans les ciments et les matériaux alcali-activés, Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2020.
- [55]. Fronek, B., Bosela, P. ET Delatte, N. (2012). Steel slag aggregate used in Portland cement concrete.
- [56]. BHATTACHARYA A.K., ADITYA D., SAMBASIVA M., « Estimation of operating blast furnace reactor invisible interior surface using Differential Evolution », *Applied Soft Computing*, vol. 13, 2013, p. 2767-2789.
- [57]. MASSAZZA F. Chimie des additions pouzzolaniques et des ciments mélangés. II Cemento
- [58]. M. Burteaux. Laitiers de haut fourneau. Technique de l'ingénieur, M 7 425. 1995. pp. 1-9.
- [59]. F.M. Léa. The chemistry of cement and concrete. «La chimie du ciment et du béton». Chemical publishing co. Inc. New York, N.Y, 1971.
- [60]. VON EUW. M. « Les laitiers de haut fourneau ». *Annales d'ITPBP*, 1981.
- [61]. R. Dron. Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline. Thèse universitaire, Paris VI, rapport de recherche No. 38, LCPC Paris, 1973.
- [62]. KOMMAR. A. « Matériaux et éléments de constructions ». Moscou, édition Mir, 1975.
- [63]. Shi C., Day R.L., Pozzolanic reactions in the presence of chemical activators : Part I. Reaction kinetics. *Cement and Concrete Research*, 30(2000), 51–58.
- [64]. Norme Algérienne NA442.Version 2013 Liants hydrauliques-ciments courants : Composition spécifications et critères de conformité, 2ème Edition, Edition Ianor, Algérie, 2013.
- [65]. Norme NF EN 196-1(2016) : Norme Européenne Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques Paris, Septembre, 2016.

- [66]. Norme NA5044 : Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X. Institut Algérien de la normalisation.
- [67]. Norme NA235 : Liants hydrauliques - Détermination de la perte au feu. Institut Algérien de la normalisation.
- [68]. Norme NA2187 : Liants hydrauliques - Détermination de la chaux libre. Institut Algérien de la normalisation.
- [69]. Norme NA2595 : Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines Institut Algérien de la normalisation.
- [70]. Norme NF EN 1097-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire.
- [71]. Norme EN 196-6 SSB : Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse. Décembre 2018.
- [72]. Norme NA229 : Ciments – Détermination de la consistance normale. Algérien de la normalisation.
- [73]. Norme NA230 : Ciments – Détermination du temps de prise. Institut Algérien de la normalisation.
- [74]. Norme NF EN 1015-6 : "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre, 1999.
- [75]. Norme EN 1015-3 - Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses), Octobre 2008.
- [76]. Norme NBN B15-215 (2018) : Essais des bétons : absorption d'eau par immersion, 2018.
- [77]. Norme NF EN 18-459 (2010) : Norme Françaises. béton-essai pour béton durci-essai de porosité et de masse volumique, 2010.
- [78]. Norme ASTM C- 642 : Cherait Y, NAFA Z, Etalement de matériaux de construction et essais. Direction des publications universitaires de Guelma, Algérie (2006).
- [79]. Norme EN 13057 (2002) : Européenne norm : products and systems for the protection and repair of concrete strictures. Test Méthods, détermination of résistance of de l'absorption capillary, 2002.
- [80]. Norme NA 5027 : béton osculation sonique mesure du temps de propagation d'ende sonique dans le béton.

[81]. Norme NA234 : Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques. Institut Algérien de la normalisation.