



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

République Algérienne

Démocratique et Populaire

العلمي والبحث العالي التعليم وزارة

الطاهر مولاي د. - سعيدة جامعة

UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR

والتكنولوجيا العلوم كلية

Faculté des Sciences et de la Technologie

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté Pour l'obtention du diplôme de Master
en Génie Civil
Spécialité : Structures

Thème :

Étude D'un Ciment Ternaire à Base De Déchet De Brique Broyé

✓ Présenté par :

✧ Adem AbdelKrim Cheikh.

✧ Chikhi Djawed Chems Eddine.

❖ Soutenu le 30 / 09 / 2026, devant le jury composé de :

Belouadi L.

MCA

Président

Benguediab S.

Pr

Encadreur

Ghefir M.

MAA

Examineur

Année universitaire 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Nous dédions ce travail aux deux créatures les plus chères à notre cœur dans cette existence, à ceux qui ont le mérite de nous avoir élevé et enseigné, à ceux qui nous ont toujours poussé vers l'avant et nous ont donné la capacité de continuer.

À notre mère bien-aimée et notre cher père.

À tous nos chers frères et sœurs, chacun en son nom.

À ceux qui nous ont aidé en paroles et en actes et nous ont soutenus dans la réalisation de ce travail.

À tous nos professeurs de l'université.

À chaque étudiant, nous lui souhaitons du succès.

Remerciements

D'abord et avant tout, on doit remercier le Dieu le tout puissant de nous avoir donné la patience, la force et la volonté afin de mener bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions notre encadreur Madame Benguediab Soumia de nous avoir fait confiance et de nous avoir suivis de près pendant toute la durée de notre travail. Nous lui adressons nos sincères remerciements pour sa disponibilité, ses orientations méthodologiques, ses conseils pertinents ainsi que pour l'intérêt constant qu'elle a porté à l'avancement de ce travail. Ses remarques constructives et ses recommandations ont contribué de manière significative à l'amélioration de cette étude et à son aboutissement.

Enfin, nous remercions chaleureusement l'administration de l'Université Moulay Tahar Saida pour avoir facilité notre accès au laboratoire, ce qui a été essentiel pour la réussite de ce projet, et tous les enseignants du département de génie civil qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

**Enfin, merci à tous*.*

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة تجريبية تهدف إلى تحضير ودراسة إسمنت ثلاثي قائم على نفايات الطوب المطحون، وذلك بهدف تقييم تأثير إدماج الطوب المطحون، المستخدم كإضافة إسمنتية، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت والملاط المحضر.

تتمثل الدراسة في تحضير أربع تركيبات إسمنتية مختلفة، حيث تم اعتماد التركيبة C1 كتركيبة شاهدة تتكون من 100% من إسمنت CEM II دون إضافة الطوب المطحون، بينما تتكون التركيبة C2 من 90% من إسمنت CEM II و10% من الطوب المطحون، والتركيبة C3 من 80% من إسمنت CEM II و20% من الطوب المطحون، في حين تتكون التركيبة C4 من 70% من إسمنت CEM II و30% من الطوب المطحون. وتسمح هذه التركيبات بدراسة تأثير زيادة نسبة الطوب المطحون على خصائص الإسمنت والملاط.

تشمل الدراسة التجريبية تحديد بعض الخصائص الفيزيائية والفيزيوكيميائية للإسمنت، لا سيما الكتلة الحجمية، قوام عجينة الإسمنت وأزمدة الشك . كما تم تحضير الملاط انطلاقاً من مختلف التركيبات الإسمنتية، بهدف تقييم مقاومتها الميكانيكية من خلال اختبارات الانحناء والضغط في أوقات مختلفة بما في ذلك الانكماش والتمدد. ثم تتم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع إسمنت المرجع C1. تسمح هذه المقارنة بتحديد تأثير نسبة استبدال جزء من إسمنت CEM II بالطوب المطحون على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت و الملاط. كما تتيح النتائج تقييم إمكانية تثمين نفايات الطوب المطحون واستخدامها كإضافة إسمنتية في تحضير إسمنت ثلاثي ، مما يساهم في تثمين هذه النفايات وتقليل استهلاك الإسمنت التقليدي.

تُظهر النتائج التجريبية المتحصل عليها أن إدماج الطوب المطحون يؤثر على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت و الملاط ، و أن أهمية هذا التأثير تعتمد على نسبة الطوب المطحون المستخدمة في كل تركيبة.

الكلمات المفتاحية : الإسمنت الثلاثي، CEM II/A-L 42.5 N، نفايات الطوب المطحون، الملاط ، الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية.

Résumé

Ce mémoire présente une étude expérimentale visant à élaborer et à étudier un ciment ternaire à base de déchets de briques broyées, dans le but d'évaluer l'effet de l'incorporation des briques broyées, utilisées comme ajout du ciment, sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment et des mortiers élaborés.

L'étude consiste à préparer quatre formulations des ciments différentes. La formulation C1 est considérée comme la formulation témoin et est constituée de 100 % de ciment CEM II, sans ajout de briques broyées. La formulation C2 est composée de 90 % de ciment CEM II et de 10 % de briques broyées, tandis que la formulation C3 contient 80 % de ciment CEM II et 20 % de briques broyées. Enfin, la formulation C4 est constituée de 70 % de ciment CEM II et de 30 % de briques broyées. Ces formulations permettent d'étudier l'influence de l'augmentation du taux de briques broyées sur les propriétés du ciment et des mortiers.

L'étude expérimentale porte sur la détermination de certaines propriétés physiques et physico-chimiques du ciment, notamment la masse volumique, la consistance de la pâte de ciment et les temps de prise. Des mortiers ont également été préparés à partir des différentes formulations des ciments afin d'évaluer leurs propriétés mécaniques à travers des essais de flexion et de compression à différents âges, ainsi que leur retrait et leur gonflement. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux du ciment de référence C1.

Cette comparaison permet de déterminer l'influence du taux de substitution d'une partie du ciment CEM II par des briques broyées sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment et des mortiers. Les résultats permettent également d'évaluer la possibilité de valoriser les déchets de briques broyées en tant qu'ajout du ciment dans l'élaboration d'un ciment ternaire, contribuant ainsi à la valorisation de ces déchets et à la réduction de la consommation de ciment traditionnel.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'incorporation des briques broyées influence les propriétés physiques et mécaniques du ciment et des mortiers, et que l'importance de cet effet dépend du taux de briques broyées utilisé dans chaque formulation.

Mots-clés : ciment ternaire, CEM II/A-L 42.5 N, déchets de briques broyées, mortier, propriétés physiques et mécaniques.

Abstract

This thesis presents an experimental study aimed at developing and investigating a ternary cement based on crushed brick waste, with the objective of evaluating the effect of incorporating crushed bricks, used as a cement addition, on the physical and mechanical properties of the cement and the prepared mortars.

The study consists of preparing four different cement formulations. Formulation C1 is considered the reference formulation and consists of 100% CEM II cement, without the addition of crushed bricks. Formulation C2 consists of 90% CEM II cement and 10% crushed bricks, while formulation C3 contains 80% CEM II cement and 20% crushed bricks. Finally, formulation C4 consists of 70% CEM II cement and 30% crushed bricks. These formulations make it possible to investigate the effect of increasing the proportion of crushed bricks on the properties of cement and mortars.

The experimental study focuses on determining certain physical and physicochemical properties of the cement, particularly density, cement paste consistency, and setting times. Mortars were also prepared from the different cement formulations in order to evaluate their mechanical properties through flexural and compressive strength tests at different ages, as well as their shrinkage and expansion. The results obtained are then compared with those of the reference cement C1.

This comparison makes it possible to determine the effect of replacing part of the CEM II cement with crushed bricks on the physical and mechanical properties of the cement and mortars. The results also make it possible to assess the potential for valorizing crushed brick waste as a cement addition in the production of ternary cement, thereby contributing to the valorization of this waste and the reduction of traditional cement consumption.

The experimental results obtained show that the incorporation of crushed bricks affects the physical and mechanical properties of cement and mortars, and that the magnitude of this effect depends on the proportion of crushed bricks used in each formulation.

Keywords: ternary cement, CEMII/A-L42.5N, crushed brick waste, mortar, physical and mechanical properties.

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES CIMENTS

1.1.Introduction.....	3
1.2. Généralités sur le ciment.....	3
1.2.1. Définition du ciment.....	3
1.2.2. Fabrication et composition du clinker Portland.....	4
1.2.3 Classification des ciments courants selon la norme NF EN 197-1...	5
1.3. Les ajouts cimentaires (additions minérales).....	8
1.3.1. Définition et rôle des additions.....	8
1.3.2. Le gypse : régulateur de prise.....	9
1.3.3. Le calcaire : addition quasi inerte à effet filler et chimique.....	9
1.4. Propriétés des ciments	10
1.4.1 Hydratation.....	10
1.4.2 Phase dormante.....	10
1.4.3 Début et fin de prise.....	10
1.4.4 Durcissement.....	10
1.4.5 Masse volumique apparente.....	10
1.4.6 Masse volumique absolue.....	11
1.4.7 Le retrait.....	11
1.4.8 L'expansion.....	11
1.4.9 Résistances mécaniques.....	11
1.4.10 Masse volumique.....	11
1.4.11 Prise et durcissement.....	12
1.4.12 Variations dimensionnelles:retrait et expansion.....	12
1.4.13. Classes de résistance.....	13
1.5. Aspects environnementaux et économiques.....	14
1.6. Conclusion.....	15

CHAPITRE 2 Généralités sur la brique et état de l'art des travaux de recherche

2.1.Introduction.....	18
2.2.Les briques.....	18
2.2.1.Définition.....	18
2.2.2. Fabrication.....	18
2.2.2.a. L'extraction et la préparation de la matière première.....	19
2.2.2.b. Le façonnage (Moulage ou Extrusion).....	19
2.2.2.c. Le séchage.....	19

2.2.2.d. La cuisson.....	19
2.2.2.e. La rectification (optionnel).....	20
2.2.2.f. Le contrôle qualité et l'emballage	20
2.2.3. Utilisation de déchets de brique dans le ciment.....	20
2.2.3.a. La réaction pouzzolanique (L'atout chimique)	20
2.2.3.b. La substitution partielle du clinker	21
2.2.3.c. L'amélioration des propriétés physiques du béton.....	21
2.2.3.d. Un impact écologique et économique majeur.....	21
2.3. Exemple des Travaux sur déchets de briques.....	22
2.3.1. Etude de comportement physique et mécanique des mortiers à base de déchet de brique.....	22
2.3.2. Renforcement de mortier de ciment à base De déchets de briques par des fibres Hybrides.....	24
2.3.3. Valorisation de déchet de brique dans la réalisation des ouvrages en béton.....	27
2.4. conclusion.....	29

CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

3.1. Introduction	31
3.2. Matériaux utilisés	32
3.2.1. Ciment binaire CEM II /A-L 42.5 N.....	33
3.2.2. Les déchets de briques broyés	34
3.2.3. Le Sable.....	35
3.3. Mesures expérimentales.....	35
3.3.1. Essai sur ciment anhydre.....	35
3.3.2. Essai à l'état frais	37
3.4. Formulation des mortiers	42
3.5. Conclusion	46

CHAPITRE 4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Introduction.....	48
4.2. Les résultats expérimentaux.....	48
4.2.1. Essais à l'état anhydre.....	48
4.2.2. Essais à l'état hydraté.....	50
4.3. Essai sur les mortiers.....	53
4.4. Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Classification des ciments courants selon la norme NF EN 197-1 [1], [2].....	6
Tableau 2.1. Différentes compositions de mortiers.....	22
Tableau 2.2.Composition des différents mortiers réalisés.....	24
Tableau 2.3.Composition Granulométrique des Bétons.....	28
Tableau 3.1. Formulations des ciments testés (substitution du CEM II par des déchets de briques broyées).....	33
Tableau 3.2. Caractérisation physico-mécanique.....	33
Tableau 3.3. Composition Chimique.....	34
Tableau 3.4. Résultat de l'essai de consistance.....	41
Tableau 3.5. Différentes combinaisons de mortier.....	43
Tableau 4.1. Valeurs de masse volumique apparente.....	49
Tableau 4.2. Valeurs de rapport (E/L) en (%).....	51
Tableau 4.3. Temps de début et de fin de prise.....	52
Tableau 4.4. Résultats de la résistance à la flexion à 2j,7j,et 28 j et 90....	54
Tableau 4.5. Résultats de la résistance à la compression à 2 j 7 j et 28 j 90j.....	56
Tableau 4.6. Valeurs de l'essai de gonflement à 7j,14j et 28 j 90 j.....	57
Tableau 4.7. Valeurs de l'essai de Retrait à 7j,14j et 28 j 90 j.....	60

Liste des figures

Figure 1.1 Étapes de fabrication du ciment Portland, du four rotatif au broyage final.....	4
Figure 1.2 Désignation normalisée d'un ciment courant selon la norme NF EN 197-1, exemple du CEM II/A – LL 32,5 R CE CP2 NF (illustration de l'auteur).....	7
Figure 2.1. Évolution de la résistance à la compression des différents mortiers avec un rapport E/L égal à 0.5.....	23
Figure 2.2.Évolution de la résistance à la compression des différents mortiers avec un rapport E/L égal à 0.45.....	24
Figure 2.3. Résistance à la compression des mortiers renforcés.....	25
Figure 2.4.Résistance à la traction des mortiers renforcés.....	25
Figure 2.5.Retrait en fonction de l'âge du MDBFMP.....	26
Figure 2.6. Gonflement en fonction de l'âge du MDBFMP.....	27
Figure 2.7.Évolution de la Résistance à la Compression des Bétons.....	28
Figure 3.1. matériel utilisé pour mesure de la masse volumique.....	36
Figure 3.2. Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.....	38
Figure 3.3. Essai de consistance.....	40
Figure 3.4.les éprouvettes avant le démoulage.....	43
Figure 4.1.valeurs de masse volumique apparente des ciments.....	49
Figure 4.2. Résultats de rapport E/L (%).....	51
Figure 4.3.Temps de début et de fin de prise des différents ciments.....	52
Figure 4.4 Résistance à la flexion à 2j, 14j et 28 j et 90j.....	55
Figure 4.5. les résultats de la Résistance à La Compression.....	56
Figure 4.6. Gonflement ($\mu\text{m}/\text{mm}$) à 7j, 14j et 28 j.....	58
Figure 4.7. Les Résultats De l'essai de Retrait.....	60

Introduction générale :

Le ciment est un matériau de base pour la construction. Composé de diverses substances naturelles, il est fortement dépendant des ressources minérales naturelles et des déchets industriels. Il est largement utilisé dans la réalisation des ouvrages de génie civil, notamment à travers la fabrication des bétons et des mortiers. Ses propriétés liantes et ses performances mécaniques lui permettent de répondre à de nombreuses exigences dans le domaine de la construction. Cependant, la production du ciment présente un impact environnemental important, notamment en raison de la consommation des matières premières et de l'énergie ainsi que des émissions de dioxyde de carbone associées à sa fabrication. Face aux enjeux environnementaux actuels et à la nécessité de préserver les ressources naturelles, la recherche de ciment plus durables constitue un domaine d'étude important.

Dans ce contexte, quatre formulations de ciment ont été préparées afin d'évaluer l'influence de l'incorporation de déchet de brique broyé à différents taux. La formulation C1, constituée de 100 % de CEM II/A-L 42.5 N, est considérée comme le ciment témoin. Les autres formulations correspondent à une substitution partielle du ciment par de la brique broyée : C2 est composée de 90 % de CEM II/A-L 42.5 N et 10 % de brique broyée, C3 de 80 % de CEM II/A-L 42.5 N et 20 % de brique broyée, tandis que C4 contient 70 % de CEM II/A-L 42.5 N et 30 % de brique broyée.

Cette variation des taux d'incorporation permet d'étudier l'influence de la quantité de la brique broyée sur les propriétés physiques et mécaniques des ciments et de comparer les résultats obtenus à ceux de la formulation de référence.

Les déchets de briques issus des activités de construction et de démolition représentent une source potentielle de matière pouvant être valorisée dans les ciments. Après les étapes de concassage, de broyage et de tamisage, les déchets de briques sont transformés en une poudre fine pouvant être incorporée au ciment en remplacement partiel de celui-ci.

Cette recherche a pour objectifs d'étudier un ciment ternaire à base de la brique broyée, Ce travail est présenté en quatre chapitres synthétisés comme suit :

Chapitre 1 : dans ce chapitre on présente les principales généralités relatives aux ciments, notamment leur définition, leur composition, leur fabrication ainsi que les différents types de ciments. Une attention particulière est accordée aux propriétés physiques et mécaniques des ciments et aux principaux essais permettant de les caractériser. Ces notions constituent une base nécessaire à la compréhension de l'étude expérimentale présentée dans les chapitres suivants.

Chapitre 2 : dans le deuxième chapitre on expose les principales caractéristiques des briques, l'origine et les propriétés des déchets de briques, ainsi que les différentes étapes de leur préparation et de leur valorisation. Une attention particulière est accordée à leur utilisation sous forme broyée dans le ciment, qui constitue la base de l'étude expérimentale réalisée dans ce travail.

Chapitre 3 : le troisième chapitre sera consacré à la partie expérimentale de cette étude consacrée à l'élaboration et à la caractérisation d'un ciment à base de briques broyées. Il décrit les différents matériaux utilisés, notamment le ciment CEM II/A-L 42,5 N, les briques broyées et les autres constituants nécessaires à la préparation des mortiers.

Enfin, le chapitre 4 : on présente les résultats des essais et les commentaires sur ces résultats, mettant en évidence les avantages et les limites des nouveaux ciments par rapport au ciment CEM II/A-L 42.5 N. L'ensemble de ces essais permet d'évaluer l'influence de l'incorporation des briques broyées sur les propriétés et les performances des ciments.

CHAPITRE 1 :

GÉNÉRALITÉS

SUR LES

CIMENTS

1.1. Introduction :

Le ciment est un matériau essentiel dans le domaine de la construction et constitue le principal liant utilisé dans la fabrication des mortiers et des bétons. Ses propriétés et ses caractéristiques influencent directement le comportement et les performances des ciments.

Ce premier chapitre a pour objectif de dresser un état de l'art des connaissances scientifiques et techniques relatives aux ciments courants. Il s'agit d'abord de rappeler les généralités sur le ciment Portland : sa définition, son procédé de fabrication, ainsi que sa classification normative et ses domaines d'emploi. Le chapitre se poursuit par une présentation des principaux ajouts cimentaires (gypse, calcaire) et de leur rôle dans la formulation des ciments composés. Les propriétés physico-mécaniques des ciments sont ensuite détaillées, en précisant pour chacune le principe de l'essai normalisé et l'appareillage utilisé. Enfin, les enjeux environnementaux et économiques liés à la fabrication du ciment sont abordés.

1.2. Généralités sur le ciment :

1.2.1. Définition du ciment :

Le ciment est défini, selon la norme européenne NF EN 197-1, comme un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement par suite de réactions et de processus d'hydratation, et qui, une fois durci, conserve sa résistance et sa stabilité mécanique même sous l'eau [1]. Cette propriété hydraulique distingue le ciment des liants aériens (comme la chaux aérienne), qui ne durcissent qu'au contact de l'air. Le ciment constitue aujourd'hui le liant le plus utilisé dans la construction, notamment pour la fabrication des mortiers et des bétons.

1.2.2. Fabrication et composition du clinker Portland :

Le constituant principal des ciments courants est le clinker Portland, obtenu par la cuisson, à une température avoisinant 1450 °C, d'un mélange soigneusement dosé de calcaire et d'argile, dénommé « cru ». Cette cuisson conduit à la formation de quatre phases minéralogiques principales : le silicate tricalcique C3S (alite), le silicate bicalcique C2S (bélite), l'aluminate tricalcique C3A et l'aluminoferrite tétracalcique C4AF [1]. Le clinker est ensuite refroidi puis broyé finement avec une faible proportion de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite), qui joue le rôle de régulateur de prise. Ce procédé de fabrication est fortement consommateur d'énergie et responsable d'émissions importantes de dioxyde de carbone, de l'ordre de 300 à 800 kg de CO₂ par tonne de ciment produit selon le type de ciment considéré [3].

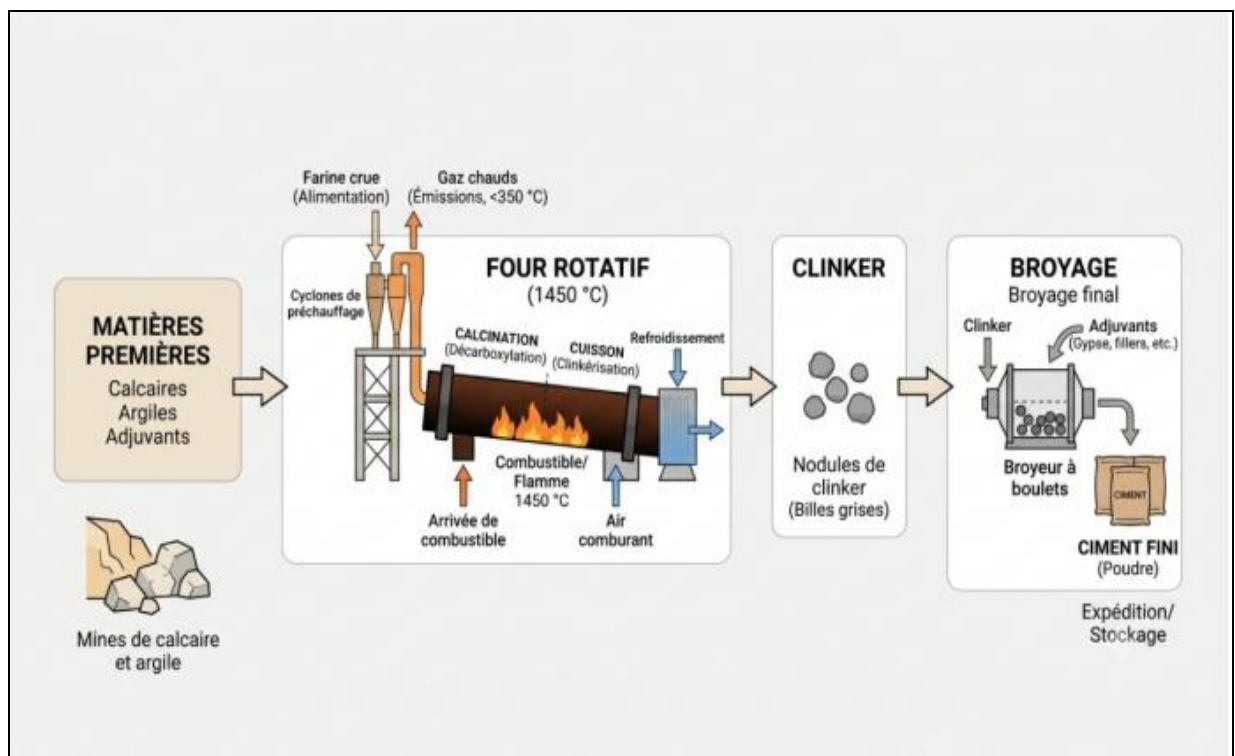


Figure 1.1 Étapes de fabrication du ciment Portland, du four rotatif au broyage final.

1.2.3 Classification des ciments courants selon la norme NF EN 197-1:

La norme NF EN 197-1 définit la composition, les spécifications et les critères de conformité de vingt-sept ciments courants, regroupés en cinq grandes familles selon la nature et la proportion de leurs constituants principaux autres que le clinker : le CEM I (ciment Portland, composé essentiellement de clinker), le CEM II (ciment Portland composé, incorporant jusqu'à 35 % d'ajouts tels que laitier, cendres volantes, pouzzolanes, calcaire ou fumée de silice), le CEM III (ciment de haut fourneau), le CEM IV (ciment pouzzolanique) et le CEM V (ciment composé) [1]. Les constituants principaux autorisés sont désignés par des lettres normalisées : K pour le clinker, S pour le laitier granulé de haut fourneau, D pour la fumée de silice, P et Q pour les pouzzolanes naturelles, V et W pour les cendres volantes, T pour le schiste calciné, et L ou LL pour le calcaire [2]. Les ciments composés (CEM II à CEM V) s'inscrivent dans cette logique de substitution partielle du clinker par des additions minérales.

**Tableau 1.1 Classification des ciments courants selon la norme NF
EN 197-1 [1], [2].**

Désignation	Appellation	Sous-types	Teneur en clinker (K)	Constituants secondaires principaux	Classes de résistance courantes
CEM I	Ciment Portland	CEM I	$\geq 95 \%$	$\leq 5 \%$ constituants secondaires	32,5 ; 42,5 ; 52,5 (N/R)
CEM II	Ciment Portland composé	A (65–94 %) et B	65 – 94 %	Laitier (S), fumée de silice (D), pouzzolanes (P, Q), cendres volantes (V, W), schiste calciné (T), calcaire (L, LL), ou mélange (M)	32,5 ; 42,5 ; 52,5 (N/R)
CEM III	Ciment de haut fourneau	A, B, C	5 – 64 %	Laitier de haut fourneau (S), 36 à 95 % selon le sous-type	32,5 ; 42,5 ; 52,5 (N/L/R)
CEM IV	Ciment pouzzolanique	A (65–89 %) et B (45–64 %)	45 – 89 %	Pouzzolanes (P, Q) et/ou cendres volantes siliceuses (V)	32,5 ; 42,5 (N/R)
CEM V	Ciment composé	A (40–64 %) et B (20–38 %)	20 – 64 %	Laitier (S) associé à une pouzzolane ou des cendres (P, Q, V)	32,5 ; 42,5 (N/R)

La désignation complète d'un ciment courant, définie par la norme NF EN 197-1, rassemble en une seule chaîne l'ensemble des informations normatives présentées ci-dessus : famille, classe de composition, nature des constituants secondaires, classe de résistance et caractéristiques complémentaires éventuelles, comme l'illustre l'exemple de la figure 1.2.

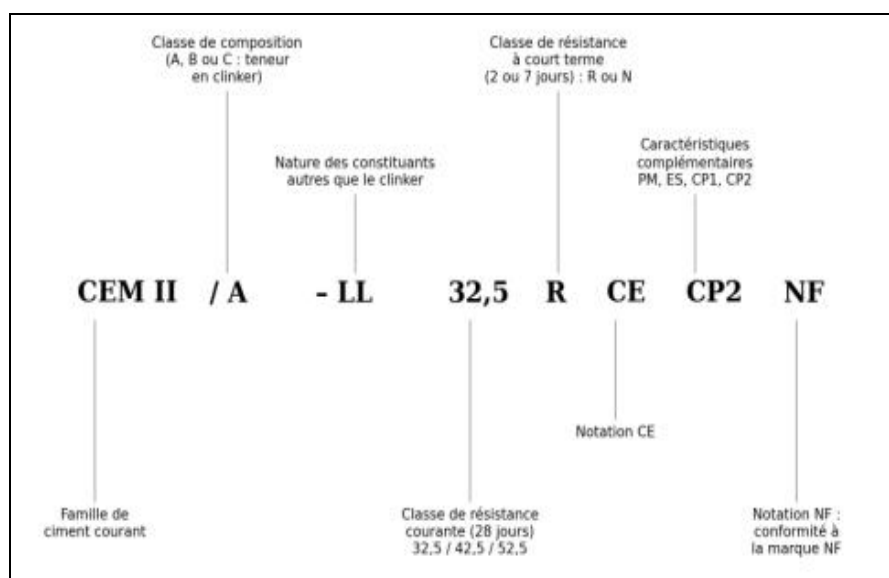


Figure 1.2 Désignation normalisée d'un ciment courant selon la norme NF EN 197-1, exemple du CEM II/A – LL 32,5 R CE CP2 NF (illustration de l'auteur, d'après [1], [2]).

1.2.4. Domaines d'emploi des ciments courants

Au-delà de leur composition normative, le choix d'un ciment courant dépend avant tout de son domaine d'emploi prévu, chaque famille présentant des atouts spécifiques en matière de résistance, de cinétique de durcissement, de résistance aux agents agressifs et de comportement en milieu massif [1], [2].

CEM I (ciment Portland) : liant de référence, compatible avec la quasi-totalité des matériaux de construction ; utilisé pour les bâtiments courants,

les travaux publics, les ouvrages hydrauliques, les fondations et les scellements.

CEM II (ciment Portland composé) : les classes 32,5 conviennent aux travaux de maçonnerie courante, tandis que les classes 42,5 et 52,5 sont adaptées au béton armé et précontraint ; globalement bien adapté aux ouvrages massifs nécessitant une élévation de température modérée à la prise.

CEM III (ciment de haut fourneau) : réservé aux travaux en milieux agressifs (eau de mer, eaux séléniteuses ou industrielles), aux ouvrages massifs (fondations, barrages) et aux travaux souterrains, du fait de sa faible chaleur d'hydratation et de sa bonne résistance chimique.

CEM IV (ciment pouzzolanique) : présente une bonne résistance mécanique à long terme mais reste sensible au froid ; utilisé pour les bétons massifs armés ou précontraints ainsi que pour les ouvrages maritimes et étanches.

CEM V (ciment composé) : propriétés proches de celles du CEM III, avec un faible retrait et une bonne tenue chimique ; employé dans les ouvrages massifs, les travaux de fondation et les milieux acides ou agressifs.

1.3. Les ajouts cimentaires (additions minérales)

1.3.1. Définition et rôle des additions

Une addition minérale est un matériau d'origine minérale, généralement finement divisé, incorporé au ciment ou aux matériaux cimentaires afin de modifier certaines de leurs propriétés [1], [4]. Selon sa nature, sa finesse et ses caractéristiques, elle peut contribuer à améliorer la

compacité, la granulométrie et certaines propriétés physiques et mécaniques du matériau [2], [4].

Les additions minérales se distinguent des adjuvants par leur nature et par les quantités généralement utilisées [1]. Leur incorporation peut notamment avoir un effet de remplissage des vides entre les particules, favoriser une structure plus compacte et influencer la demande en eau ainsi que le comportement du matériau à l'état frais et durci [2], [4]. Leur utilisation s'inscrit également dans une démarche de valorisation de matériaux minéraux et de développement de solutions adaptées aux exigences des matériaux de construction [4].

1.3.2. Le gypse : régulateur de prise

Le gypse (sulfate de calcium dihydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est ajouté au clinker lors du broyage, généralement à hauteur de quelques pour cent, dans le but de réguler la prise du ciment. En son absence, l'hydratation rapide de l'aluminate tricalcique (C3A) provoquerait une prise quasi instantanée du ciment (fausse prise ou prise éclair), incompatible avec la mise en œuvre du matériau. Le gypse réagit avec le C3A pour former de l'ettringite, ce qui ralentit la réaction et permet d'obtenir un temps de prise compatible avec les usages du génie civil.

1.3.3. Le calcaire : addition quasi inerte à effet filler et chimique

Le calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3), lorsqu'il est incorporé finement broyé dans le ciment, agit principalement par un effet physique de filler : ses particules fines comblent les vides interstitiels de la matrice cimentaire et offrent des surfaces de nucléation supplémentaires qui favorisent et accélèrent l'hydratation des grains de clinker, en particulier la formation des C-S-H [2]. Au-delà de cet effet physique, le calcaire peut également participer chimiquement à l'hydratation lorsqu'il est associé à

une phase alumineuse réactive (par exemple issue d'une argile calcinée) : les ions carbonate dissous réagissent avec l'alumine pour former des phases carboaluminates (hémicarboaluminate et monocarboaluminate), ce qui contribue à densifier la microstructure [11]. C'est précisément ce couplage entre calcaire et matériau alumino-silicaté calciné qui constitue le principe de fonctionnement des ciments composés ternaires.

1.4. Propriétés des ciments :

1.4.1 Hydratation : les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes.

1.4.2 Phase dormante : ou la pâte pure (ciment et eau) restée apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent ;

1.4.3 Début et fin de prise : après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.

1.4.4 Durcissement : on a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement ; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

1.4.5 Masse volumique apparente : varie de 800 à 1300Kg/m³ (1Kg/l) en moyenne.

1.4.6 Masse volumique absolue : varie de 2900 à 3150Kg/m³ suivant le type de ciment.

1.4.7 Le retrait : la mesure de gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme 4×4×16 cm sur mortier normal. Le retrait limité à 0,8 mm/m pour le ciment CPA et CPJ de classe 45R et 55. Il n'est pas normalisé pour les autres ciments (CLK, CHF, CLC).

1.4.8 L'expansion : se mesure grâce aux aiguilles de Lechâtelier.

L'expansion ne doit pas être supérieure à 10mm sur pâte pure pour tous les ciments.

1.4.9 Résistances mécaniques : elles caractérisent de façon conventionnelle, la résistance du ciment rattachée à une classe de résistance définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la moyenne M des deux limites nominales inférieure et supérieure ($M \pm 10$ MPa) de la résistance à la compression à 28 jours.

1.4.10 Masse volumique

On distingue la masse volumique apparente, qui tient compte des vides interstitiels entre les grains et varie en moyenne entre 800 et 1300 kg/m³ selon le tassement de la poudre, de la masse volumique absolue, propre à la matière solide elle-même, qui varie de 2900 à 3150 kg/m³ selon le type de ciment considéré [2]. Le principe de mesure diffère selon la grandeur recherchée : la masse volumique apparente est déterminée en remplissant, par chute libre et sans tassement, un récipient cylindrique de volume connu à l'aide d'un entonnoir tronconique monté sur trépied, puis en

rapportant la masse de poudre récoltée au volume du récipient ; la masse volumique absolue, quant à elle, nécessite de s'affranchir du volume des vides interstitiels et se mesure généralement au moyen d'un pycnomètre ou d'un volumènomètre à liquide inerte, sur le principe de la poussée d'Archimède.

1.4.11 Prise et durcissement

Dès le contact du ciment avec l'eau de gâchage, des réactions d'hydratation complexes s'amorcent. Une phase dite dormante, pouvant durer de quelques minutes à quelques heures selon la nature du ciment, précède le début de prise, marqué par une augmentation brusque de la viscosité de la pâte et un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable pour devenir un matériau rigide ; ce basculement est ralenti par l'ajout de gypse lors du broyage du clinker, ce qui permet d'obtenir un temps de prise compatible avec la mise en œuvre sur chantier. Le durcissement désigne la période qui suit la prise, pendant laquelle l'hydratation se poursuit et la résistance mécanique continue de croître, très lentement, la valeur à 28 jours étant retenue par convention comme valeur de référence [2]. Le début et la fin de prise sont mesurés à l'aide de l'appareil de Vicat, conformément à la norme NF EN 196-3.

1.4.12 Variations dimensionnelles : retrait et expansion

Le retrait et le gonflement sont mesurés sur éprouvettes prismatiques de mortier normal ($4 \times 4 \times 16$ cm) munies de plots métalliques à chaque extrémité, sur lesquelles vient s'appuyer un comparateur à cadran ou un extensomètre numérique monté sur un bâti de référence de longueur fixe : la variation de longueur de l'éprouvette au cours du temps, rapportée à sa longueur initiale, donne directement la déformation (retrait ou gonflement)

du matériau. Pour les ciments Portland et Portland composés des classes de résistance 45R et 55, le retrait est limité à 0,8 mm/m ; cette limite n'est en revanche pas normalisée pour les ciments de haut fourneau ou composés (CHF, CLC) [2]. L'expansion, quant à elle, se mesure sur pâte pure à l'aide des aiguilles de Le Chatelier, un moule fendu muni de deux index dont l'écartement, mesuré avant et après immersion en eau chaude, traduit l'expansion de la pâte ; cet écartement ne doit pas dépasser 10 mm, une valeur excessive traduisant généralement un excès de chaux libre (CaO) ou de magnésie (MgO) dans le clinker.

1.4.13. Classes de résistance

Les résistances mécaniques caractérisent, de façon conventionnelle, la résistance du ciment rattachée à une classe de résistance définie par sa valeur nominale : celle-ci correspond à la moyenne M des deux limites nominales inférieure et supérieure ($M \pm 10$ MPa) de la résistance à la compression à 28 jours, mesurée sur éprouvettes de mortier normalisé conformément à la norme NF EN 196-1 [1], [2]. Le principe de l'essai consiste à rompre en flexion trois points, puis en compression, des éprouvettes prismatiques de mortier normalisé ($4 \times 4 \times 16$ cm) à l'aide d'une presse d'essai mécanique équipée d'un dispositif de flexion et de plateaux de compression : une charge croissante est appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette, la contrainte de rupture étant ensuite rapportée à la section résistante pour obtenir la résistance mécanique recherchée. C'est cette classe de résistance (32,5, 42,5 ou 52,5) qui complète, avec le suffixe N ou R selon la résistance à court terme.

La confrontation de ces différents résultats dans la littérature met en évidence l'existence d'un optimum de substitution, généralement situé entre 10 % et 20 % pour les matériaux de type argile calcinée peu réactive,

au-delà duquel les gains apportés par la réaction pouzzolanique ne compensent plus l'effet de dilution du clinker. Cet optimum dépend étroitement de la réactivité propre de l'addition utilisée, ce qui justifie une caractérisation expérimentale systématique pour chaque nouveau matériau envisagé.

1.5. Aspects environnementaux et économiques

La valorisation des déchets de briques sous forme de poudre constitue une solution intéressante dans une démarche de développement de matériaux de construction plus durables. L'utilisation de briques broyées comme addition au ciment permet de donner une nouvelle valeur à un déchet issu notamment des activités de construction et de démolition, tout en limitant la quantité de déchets destinés à l'élimination. Cette approche favorise ainsi la récupération et la réutilisation des matériaux minéraux dans le secteur de la construction.

Sur le plan économique, l'utilisation de la brique broyée peut également présenter un intérêt lorsque les déchets sont disponibles localement. Après les étapes de collecte, de concassage, de broyage et de tamisage, ce matériau peut être incorporé dans les formulations de ciment à différents pourcentages. La valorisation de ces déchets peut ainsi contribuer à réduire la consommation de ciment conventionnel et à favoriser l'utilisation de ressources disponibles localement. L'intérêt économique dépend toutefois des coûts liés à la collecte, au transport et à la préparation de la brique broyée [4–7].

1.6. Conclusion:

Cette recherche bibliographique a permis de rappeler les bases de la fabrication et de la classification normative des ciments Portland courants, ainsi que le rôle des principaux ajouts cimentaires (gypse, calcaire) dans l'amélioration de leurs propriétés physico-mécaniques. Les principes des essais normalisés couramment utilisés pour caractériser un ciment (masse volumique, consistance, prise, retrait, expansion, résistances mécaniques), ainsi que l'appareillage associé, ont également été détaillés. Ces éléments généraux constituent le socle théorique et normatif sur lequel s'appuiera la suite de ce mémoire.

CHAPITRE 2 :

Généralités sur la brique et état de l'art des travaux de recherche

2.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on présente quelques travaux et recherches réalisés sur l'incorporation du déchet de briques dans les ciments, mortiers et béton avec des pourcentages différents, en montrant les méthodes de l'élaboration de différents matériaux, les propriétés étudiées ainsi que les résultats trouvés par ces travaux, mais tout d'abord on commence par la définition de brique, sa fabrication, et pourquoi le choix de déchets de briques pour les réutiliser dans les matériaux de construction.

2.2. Les briques :

2.2.1. Définition :

La brique est un matériau de construction obtenu par le moulage puis la cuisson d'une pâte argileuse. Elle se présente sous forme de parallélépipède de dimensions normalisées, utilisé depuis l'Antiquité pour l'édification de murs, de cloisons et de structures maçonnées.

On distingue principalement la brique pleine, obtenue par un moulage compact, et la brique creuse, alvéolée pour réduire son poids et améliorer ses performances thermiques.

La qualité d'une brique dépend essentiellement de la nature de l'argile employée, de sa mise en forme et des conditions de cuisson, qui conditionnent sa résistance mécanique, sa porosité et sa durabilité.

2.2.2. Fabrication :

La fabrication de la brique de terre cuite est un procédé millénaire qui s'est industrialisé au fil des siècles. Elle repose sur la transformation d'une roche sédimentaire naturelle : l'argile.

2.2.2.a. L'extraction et la préparation de la matière première :

- **L'extraction** : L'argile est extraite dans des carrières à ciel ouvert, souvent situées à proximité immédiate de la briqueterie pour limiter le transport.
- **Le broyage et le mélange** : L'argile brute est broyée pour éliminer les impuretés (cailloux). Elle est ensuite mélangée à du sable (pour réduire le retrait au séchage) et à de l'eau jusqu'à obtenir une pâte homogène et malléable.

2.2.2.b. Le façonnage (Moulage ou Extrusion) :

Il existe deux méthodes principales pour donner sa forme à la brique :

- **L'extrusion (ou étirage)** : La pâte d'argile est poussée sous haute pression à travers une filière (un moule en acier). Cela forme un long ruban continu d'argile, qui est ensuite découpé à l'aide de fils d'acier tendus pour obtenir des briques individuelles. C'est la méthode utilisée pour les **briques creuses** modernes.
- **Le moulage** : La pâte est pressée dans des moules individuels. Cette méthode traditionnelle est encore utilisée pour les **briques pleines** apparentes ou de parement (style "moulé-main").

2.2.2.c. Le séchage :

Une brique fraîchement façonnée contient entre 15 % et 30 % d'eau. Si on la cuisait immédiatement, l'eau s'évaporerait trop vite, provoquant des fissures et des déformations.

- Les briques sont envoyées dans un **séchoir industriel** automatisé.
- L'eau s'évapore progressivement sous l'effet d'un flux d'air chaud (souvent récupéré des fours) pendant **15 à 45 heures**.

2.2.2.d. La cuisson :

C'est l'étape cruciale qui transforme l'argile poreuse en un matériau céramique dur, résistant et imperméable.

- Les briques traversent un **four tunnel** géant (qui peut mesurer plus de 100 mètres de long).
- La température augmente progressivement jusqu'à atteindre **900 °C à 1 200 °C**, avant de redescendre lentement.
- Cette chaleur déclenche des réactions chimiques (la vitrification) qui donnent à la brique sa solidité et sa couleur rouge finale (due à la présence d'oxyde de fer dans l'argile).

2.2.2.e. La rectification (optionnel) :

Pour les briques creuses modernes dites "hautes performances", les faces supérieures et inférieures sont rectifiées (meulées) au millimètre près après la cuisson. Cela permet de les poser avec un **joint mince de mortier-colle**, ce qui supprime les ponts thermiques et accélère le chantier.

2.2.2.f. Le contrôle qualité et l'emballage :

- Les briques sont inspectées (taille, résistance, fissures).
- Elles sont ensuite empilées sur des palettes, filmées et expédiées vers les chantiers.

2.2.3. Utilisation de déchets de brique dans le ciment :

L'utilisation des déchets de briques rouges (briques déclassées, débris de chantiers) dans la fabrication du ciment et du béton repose sur des propriétés chimiques et physiques majeures. Lorsqu'ils sont finement broyés, ces résidus de terre cuite agissent comme un liant actif ou comme un composant structurel.

2.2.3.a. La réaction pouzzolanique (L'atout chimique) :

L'explication principale tient en un mot : la **pouzzolanité**. [[1](#)]

- La brique est fabriquée à partir d'argile cuite entre 900 °C et 1 200 °C. Cette cuisson transforme l'argile en une structure amorphe riche en **silice et en alumine réactives**. [[1](#)]
- Lorsqu'on broie très finement ces déchets de brique et qu'on les mélange au ciment en présence d'eau, la silice réactive se combine avec la chaux libre (hydroxyde de calcium) libérée par le ciment. [[1](#), [2](#)]
- Cette réaction chimique secondaire crée de nouveaux composés liants (des silicates de calcium hydratés), qui **fortifient la structure du ciment à cœur**, augmentant sa résistance et sa durabilité mécanique à long terme. [[1](#), [2](#)]

2.2.3.b. La substitution partielle du clinker :

Le clinker est l'ingrédient principal du ciment traditionnel, mais sa fabrication est extrêmement énergivore et polluante. En usine ou en laboratoire, les déchets de brique réduits en poudre peuvent **substituer entre 10 % et 20 % du ciment**. Le ciment ainsi obtenu conserve des propriétés de compression et de traction tout à fait comparables à celles d'un ciment classique, voire supérieures. [[1](#), [2](#), [3](#)]

2.2.3.c. L'amélioration des propriétés physiques du béton :

Au-delà de la poudre de ciment, les débris de briques légèrement plus gros peuvent remplacer les granulats traditionnels (graviers) dans le béton :

- **Réduction du poids** : La brique cuite est plus poreuse et plus légère que la pierre naturelle, permettant de concevoir des bétons allégés bien tolérés par les structures. [[1](#)]
- **Rétention d'eau interne** : Les pores de la brique absorbent l'eau de gâchage lors du mélange, puis la restituent lentement. Cette "cure interne" évite que le béton ne sèche trop vite et limite le risque de microfissures.

2.2.3.d. Un impact écologique et économique majeur :

- **Réduction de l'empreinte carbone** : Remplacer une partie du ciment par de la brique recyclée réduit massivement les émissions de CO₂ associées à l'industrie cimentière.
- **Économie circulaire** : Cela évite l'accumulation de milliers de tonnes de déchets inertes dans les décharges en réutilisant les rebuts de briqueteries et de déconstruction.

2.3. Exemple des Travaux sur déchets de briques :

Dans cette partie on présente quelques résultats de recherches sur la valorisation de déchets de brique dans les ciments

2.3.1. ETUDE DE COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DES MORTIERS A BASE DE DECHET DE BRIQUE :

Dans ce travail, les chercheurs ont incorporé la poudre de déchets de brique dans les mortiers afin d'étudier son influence sur les caractéristiques physico-chimiques du mortier.

La poudre de déchets de briques est ajout au ciment CEM I 42.5 R de la société LAFARGE avec des pourcentages suivants 0,10 ,20 et 30 %.

Les résultats des essais mécaniques sont les suivants.

Tableau 2.1. Différentes compositions de mortiers

Materiaux	Mortier 0 % PB	Mortier 10 % PB	Mortier 20 % PB	Mortier 30 % PB
Ciment g	450	405	360	315
Sable g	1350	1350	1350	1350
Poudre en brique PB g	0	45	90	135
E/L=0.5	225	225	225	225
E/L=0.45	202.5	202.5	202.5	202.5

Dans cet essai les chercheurs ont étudié l'influence de l'ajout de la poudre de déchets de brique et la quantité d'eau sur la résistance à la compression à 7, 28, 90 et 120j. Les résultats montrent que :

Pour une quantité d'eau 0.5, le pourcentage 20% donne des meilleurs par contre pour quantité de 0.45, on trouve les meilleurs résultats de compression avec le pourcentage 10%. L'évolution de la résistance à la compression, pour tous les mortiers avec un rapport E/L égal à 0.5, est plus significative par rapport à celle obtenue dans le cas des mortiers avec un rapport E/L égal à 0.45. Ceci peut être expliqué par la quantité de liant qui est mieux hydraté quand la quantité d'eau est plus importante (E/L élevée) Alors, une quantité du liant peut rester toujours anhydre dans le cas du mortier avec E/L égal à 0.45. Par ailleurs, les résultats montrent aussi qu'un surdosage en poudre de brique (30% PB) conduit à une diminution dans la résistance mécanique du mortier par le fait que les liaisons chimiques du gel C-S-H peuvent être minimisées avec une quantité moindre en ciment et par conséquent une résistance mécanique plus faible est enregistrée à long terme .

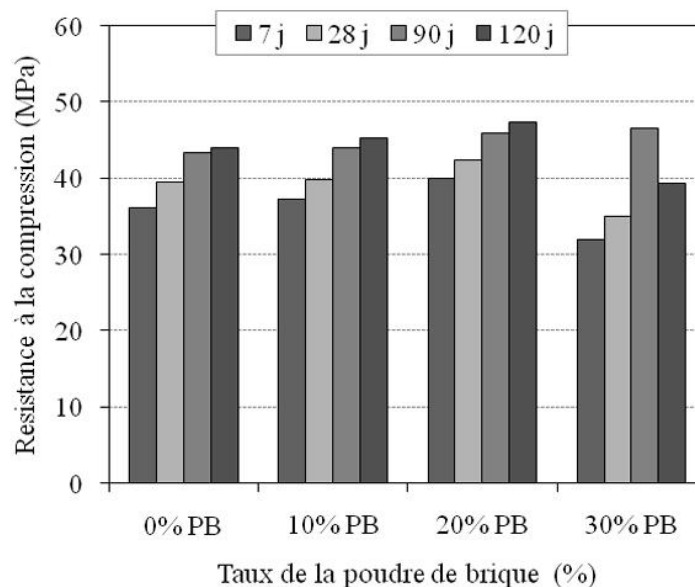


Figure 2.1. Évolution de la résistance à la compression des différents mortiers avec un rapport E/L égal à 0.5.

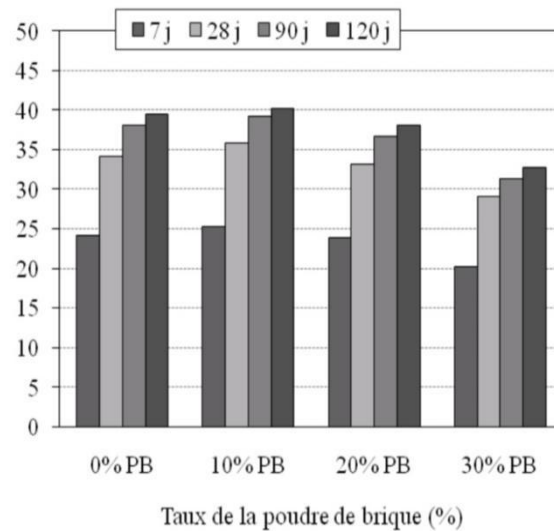


Figure 2.2.Évolution de la résistance à la compression des différents mortiers avec un rapport E/L égal à 0.45.

2.3.2. Renforcement de mortier de ciment à base De déchets de briques par des fibres Hybrides :

Dans ce travail les chercheurs Boukhada et al [] Ont étudié l'influence De renforcement de mortier à base de déchets de briques par des fibres hybrides. Les chercheurs ont remplacé une quantité de sable par les déchets de briques suivant le tableau au-dessous:

Tableau 2.2.Composition des différents mortiers réalisés

Type de Mortier	Substitution (%)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	E/C	Super-Plastifiant		Déchets de Brique g	Fibre Métallique		Fibre Polypropylène	
						g	%		g	%	g	%
MT	0	450	1 350	225	0.5	0.45	0.1	0	0	0	0	0
Db+FM+FP	10	450	1215	225	0.5	2.25	0.5	120	0.9	0.2	0.45	0.1
Db+FM+FP	20	450	1080	225	0.5	3.15	0.7	240	1.35	0.3	0.9	0.2
Db+FM+FP	30	450	945	225	0.5	4.05	0.9	360	1.8	0.4	1.35	0.3
Db+FM+FP	40	450	480	225	0.5	5.85	1.3	480	2.25	0.5	1.8	0.4
Db+FM+FP	50	450	675	225	0.5	6.75	1.5	600	2.7	0.6	2.25	0.5
Db+FM+FP	60	450	540	225	0.5	7.65	1.7	720	3.15	0.7	2.7	0.6

On s'intéresse Aux résultats Des essais mécaniques Flexion et compression ainsi les résultats des essais physiques retrait et gonflement.

La figure 2.3 présente les Résultats de l'essai de compression, on marque une augmentation de la résistance avec L'augmentation de Pourcentage de déchets de brique et les fibres, la même remarque avec les résultats de l'essai de traction affichés sur la figure 2.4.

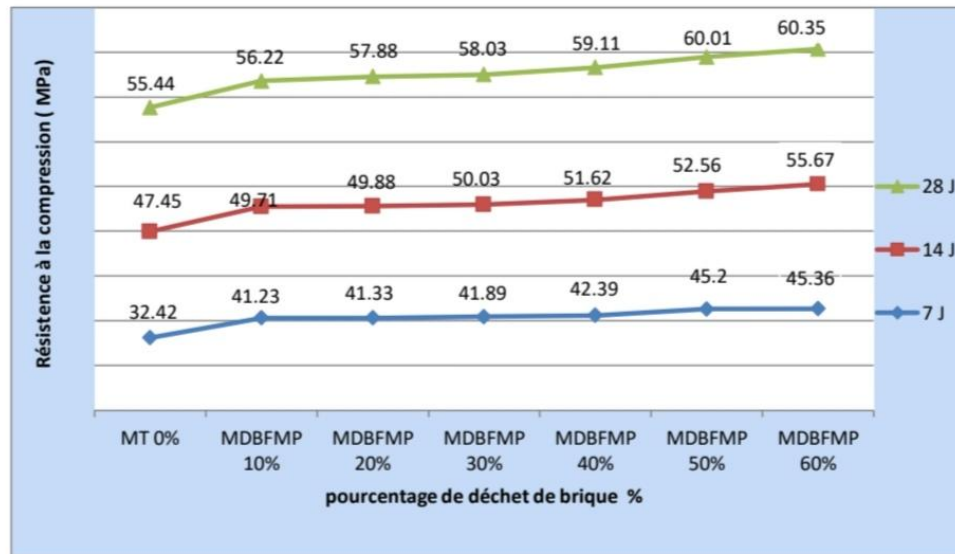


Figure 2.3. Résistance à la compression des mortiers renforcés

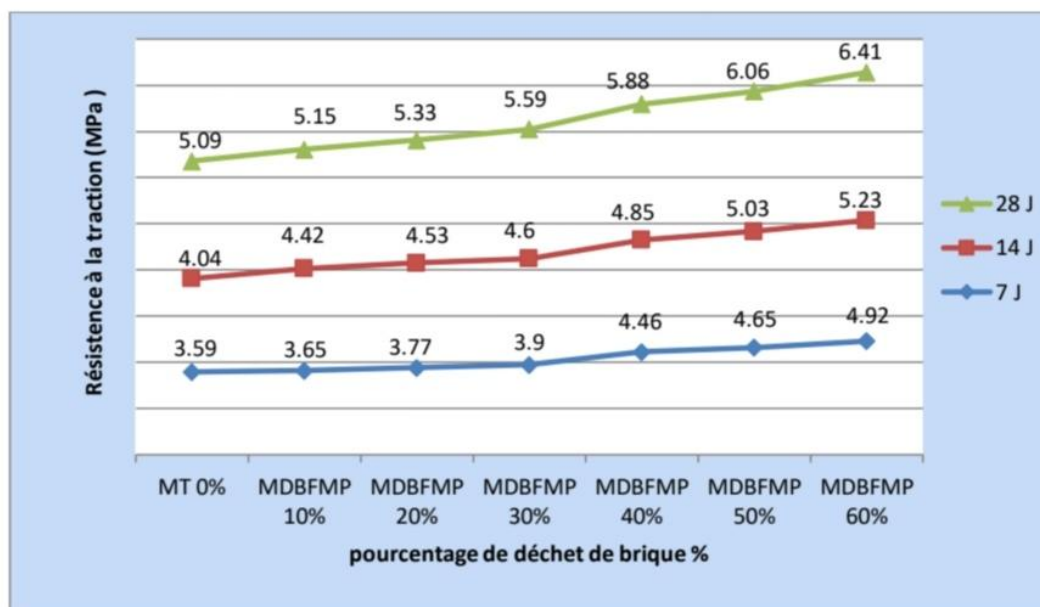


Figure 2.4. Résistance à la traction des mortiers renforcés

La figure 2.5 Présente l'évolution moyenne du retrait à l'air libre des mortiers à base de déchet de brique avec les fibres métallique et polypropylène réalisés au cours du premier mois après coulage.

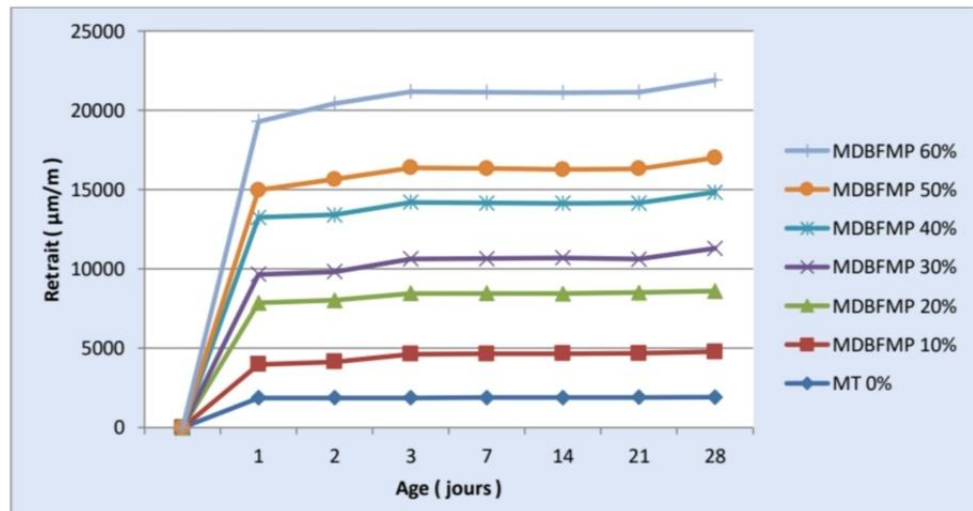


Figure 2.5. Retrait en fonction de l'âge du MDBFMP

D'après le figure 2.5 du retrait, on remarque que le retrait augmente dans le temps (jours), on peut dire que les fibres métalliques et polypropylène ayant un effet négatif, en augmentation avec le taux élevé des fibres métallique et polypropylène.

De la même façon que le retrait, les résultats de l'essai de gonflement sont présentés dans le Figure 2.6 suivante :

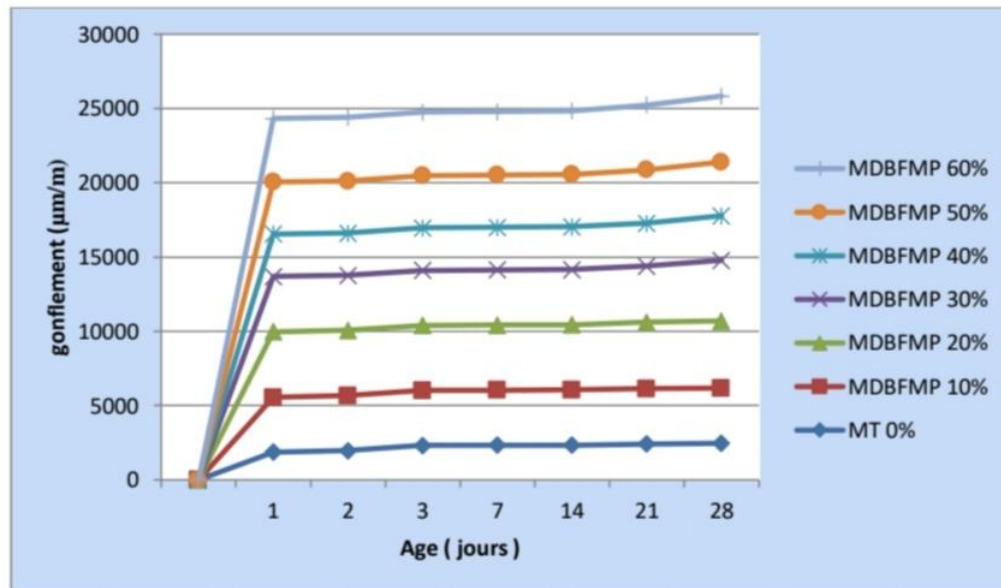


Figure 2.6. Gonflement en fonction de l'âge du MDBFMP

D'après la figure 2. 6, on remarque que le gonflement dans l'eau du mortier à base de déchet de brique avec les fibres métallique et polypropylène augmentent, on peut dire que le taux élevé du pourcentage des déchets de briques avec les fibres métalliques et polypropylène ont un effet négatif sur le mortier composite. Ceci revient au pouvoir absorbant de l'eau par les déchets des briques.

2.3.3. Valorisation de déchet de brique dans la réalisation des ouvrages en béton :

Dans ce travail Le chercheur étudie Expérimentalement un béton à base de déchets de brique provenant de la briqueterie. Les résultats seront comparés au béton ordinaire usuel.

Partant D'un béton initial parfaitement Connue du point de vue de sa Composition et ses propriétés mécaniques qu'on appelle un ' béton A témoin », Et il a étude, trois types de bétons à base de déchets de brique

Tableau 2.3.Composition Granulométrique des Bétons

Types de béton	Granulats naturels			Granulats recyclés		
	S _N (0/5)	G _N (3/8)	G _N (8/15)	S _R (0/5)	G _R (3/8)	G _R (8/15)
B-O	X	X	X			
B-RN		X	X	X		
B-NR	X				X	X
B-RR				X	X	X

Avec :B-O : Béton ordinaire usuel « béton A témoin »

B-RN : Béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée

B-NR : Béton de brique concassée avec sable naturel

B-RR : Béton entièrement en brique concassée

La figure 2.7 présente L'évolution de la résistance de compression de différents béton, on remarque L'augmentation De la résistance pour les bétons De déchets de briques au cours du temps, Se fait tout de même Manière que le béton ordinaire. Ceci est dû à la confection de Tous les bétons avec un rapport eau /ciment constant.

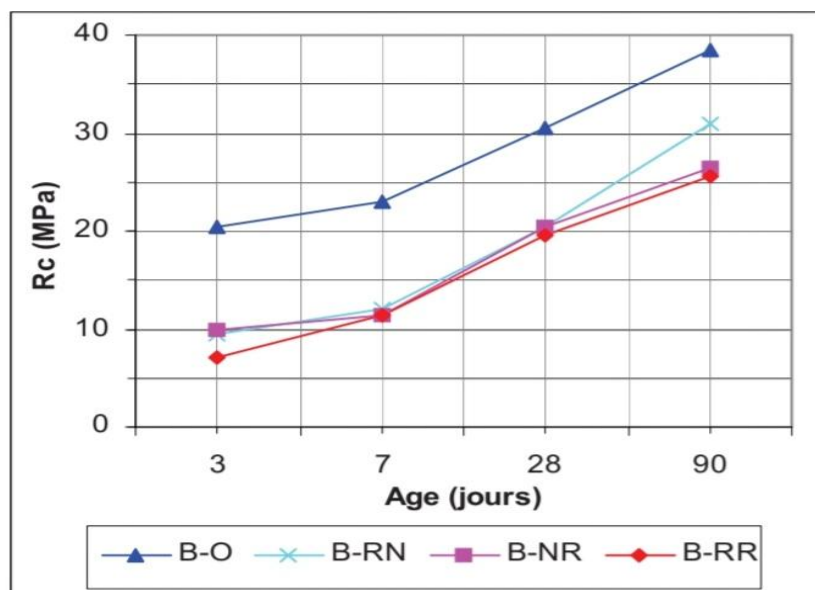


Figure 2.7.Évolution de la Résistance à la Compression des Bétons

On peut dire que la résistance des bétons à base de déchets de brique utilisés, progresse plus vite dans les premiers jours et que la résistance élevée remarquée est due à la bonne adhérence entre le mortier et les granulats.

2.4. conclusion :

D'après ce qu'on a vu au précédent, on trouve que les déchets de briques sont intéressant et peut être utilisé soit pour comme ajout pour ciment ou granulats avec des mortiers et bétons.

Dans notre travail on étudie la possibilité d'ajouter les déchets de briques dans un ciment binaire CEM II en constituant un ciment ternaire.

CHAPITRE 3 :

ÉTUDE

EXPÉRIMENTALE

3.1. Introduction :

Dans l'industrie du ciment, lorsqu'un seul constituant secondaire est ajouté au ciment, on dit que le liant ou ciment obtenu est « binaire ». Et, s'il y en a deux, il est « ternaire ».

Ces ciments ternaires sont conçus pour offrir des performances élevées tout en étant plus respectueux de l'environnement. Ils sont utilisés dans divers projets de construction, offrant une alternative plus durable aux ciments traditionnels.

Les ciments ternaires sont des mélanges composés de ciment CEM II/A-L 42.5 N et des déchets de briques broyées. Ils offrent des performances mécaniques et de durabilité similaires à celles des ciments traditionnels, tout en réduisant l'empreinte environnementale et carbone liée à la production du clinker.

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de l'incorporation de poudre de briques broyées sur les propriétés du ciment et du béton.

Une étude portant sur des ciments composés a montré que le remplacement de 30 % de ciment ordinaire par de la poudre de brique recyclée entraînait une réduction de résistance comprise entre 10,7 % et 28 % selon la finesse des particules, tandis qu'une mouture plus fine permettait d'atténuer en partie cet effet et de raccourcir les temps de prise.

À l'inverse, une étude sur l'incorporation de poudre de brique broyée dans le béton a montré qu'un taux de substitution de 10 % offrait la meilleure performance mécanique, avec une amélioration de la résistance à la compression pouvant atteindre 54 % par rapport au mélange de référence, tandis qu'un taux de 15 % offrait les meilleures propriétés d'isolation thermique.

Afin d'approuver la valorisation des déchets de briques broyées comme ajout dans le ciment ternaire, on réalise une étude comparative entre différentes formulations de ciment à base de briques broyées, en substitution partielle du clinker à différents taux.

3.2. Matériaux utilisés :

Le tableau suivant présente les différents pourcentages ainsi les différentes masses des composantes des ciments (C1-C4):

Tableau 3.1. Formulations des ciments testés**(substitution du CEM II par des déchets de briques broyées)**

matériaux	Nomination	Ciment CEM II (g)	Déchet de brique broyé (g)
100% CEM II	C1	450	0
90% CEMII+ 10% Déchet de brique broye	C2	405	45
80% CEM II + 20% Déchet de brique broyé	C3	360	90
70% CEM II + 30% Déchet de brique broyé	C4	315	135

3.2.1.Ciment binaire CEM II /A-L 42.5 N : ciment portland au calcaire, fabriqué dans la cimenterie de Saida (société des ciments de Saïda, SPA), Ces caractéristique physico-mécanique et sa composition chimique sont présentés sur les tableaux (3.2) et (3.3) successivement :

Tableau 3.2. Caractérisation physico-mécanique.

Caractérisation	Valeurs de Garantie
Début de prise(min)	≥ 60
Compression 02 jours	≥ 12
Compression 28 jours	≥ 42.5
Expansion à chaud sur pate(mm)	≤ 10

Tableau 3.3. Composition Chimique.

Caractérisation	Valeurs de Garantie
SO ₃ %	≤3.5%
Teneur en chlorure%	≤0.1
Ajout(calcaire)	6-20%

3.2.2. Les déchets de briques broyées :

Les déchets de briques sont des restes de matériaux provenant de la fabrication, de la construction, de la rénovation ou de la démolition de structures contenant des briques. Ces déchets comprennent les briques cassées, les briques tombées, les briques inutilisées ou les briques récupérées lors de la démolition. Les briques usagées peuvent être recyclées et réutilisées dans diverses applications de construction afin de réduire les déchets envoyés aux décharges et de promouvoir la durabilité dans le secteur de la construction.

Le déchet de brique utilisée en provenance du briqueterie moderne de Saida, Sarl sidi el hadj Abdelkrim, Route de Sidi Bel Abbès l'ouest de l'Algérie. Pour pouvoir la substituer au ciment, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité

et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite broyé puis passé au tamisage.

Le tamisât de 0.08 mm est récupéré et utilisé en substitution au ciment à différentes proportions et à différentes échéances.

3.2.3.Le Sable:

Le sable est un matériau granulaire constitué de particules minérales provenant principalement de l'érosion et de la fragmentation des roches naturelles. Il est largement utilisé comme granulat dans la confection des mortiers et des bétons. Ses caractéristiques, notamment sa granulométrie, sa forme, sa propreté et sa nature minéralogique, influencent les propriétés des matériaux cimentaires.

3.3.Mesures expérimentales :

3.3.1.Essai sur ciment anhydre :

❖ Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente ou plus précisément masse volumique apparente sans

tassement, souvent appelée improprement densité apparente , est une grandeur utilisée

essentiellement avec les substances se présentant sous forme de granulés, dans l'agroalimentaire, en pédologie pour la description des sols, ou dans le BTP par exemple, afin de rendre compte de la masse de matériau contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air interstitiel. De ce point de vue, la masse volumique apparente d'un même matériau granulé ou pulvérulent peut varier en fonction du mode de manutention, selon qu'il est plus ou moins tassé ou, au contraire, aéré :



Figure 3.1. matériel utilisé pour mesure de la masse volumique.

1. Peser le récipient de 1L de volume vide soit m_1 .
2. Remplir le récipient par un entonnoir métallique spéciale.
3. Araser la couche supérieure du récipient à l'aide d'une réglette d'un mouvement de « va-et-vient »,

4. - Peser le récipient plein : soit m_2 (g) sa masse.
5. - Calculer la masse volumique apparente du matériau avec la formule suivante :

$$\gamma_{ap} = (M_2 - M_1)/V$$

6. Refaire ces étapes au moins 5 fois et calculer la moyenne

3.3.2. Essai à l'état frais :

❖ Essai de consistance :

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

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

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

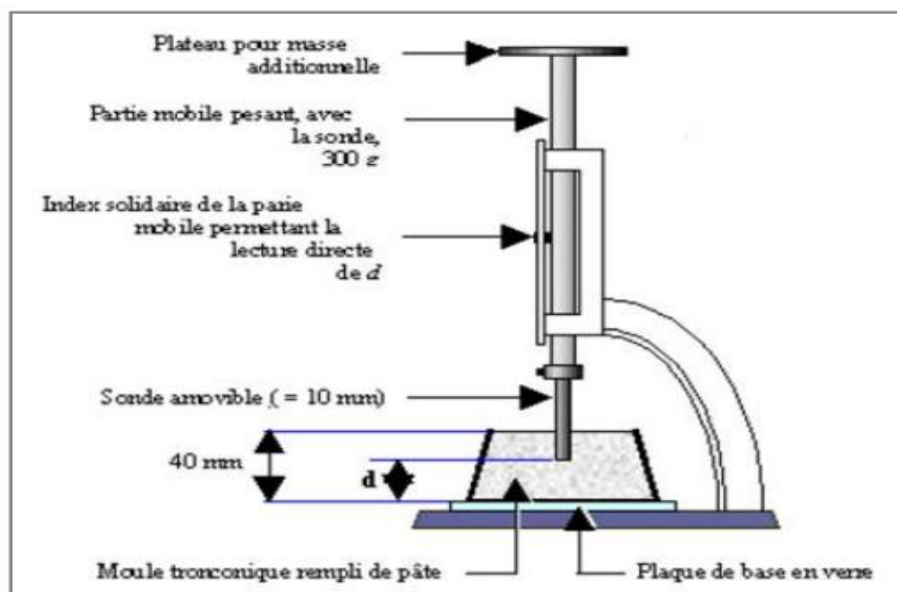


Figure 3.2. Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée : $C=450\text{g}$ et $E=120\text{g}$

- Introduire la quantité d'eau choisie dans la cuve du malaxeur. (ici, on peut déterminer $E/C=0.26$)

1-Peser 450g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur.

2 - Mettre immédiatement le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant 90 s.

3- Arrête le malaxeur pendant 15 s.

4- Ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage.

5 - Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

6- La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive ; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectuer avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

7 - Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de

l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base. Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.

* Si $(d) = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée)



Figure 3.3. Essai de consistance.

❖ **Essai de prise :**

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus au moins malléable voire plastique, mais au bout d'un certain temps, le matériau devient de plus en plus difficile à travailler et sa température augmente : il fait prise et devient de plus en plus solide. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée, tableau 3.4. Présente le rapport E/C utilisé pour chaque ciment pour la mesure de temps de début et fin de prise de chacun :

Tableau 3.4. Résultat de l'essai de consistance.

ciment	Rapport E/L	Masse de ciment (g)	Quantité d'eau en ml
Ciment 1 (témoin)	28,9 %	450	130
Ciment 2	29,8 %	450	134
Ciment 3	31,6 %	450	142
Ciment 4	34,4 %	450	155

1 - Introduire la quantité d'eau choisi dans la cuve du malaxeur.

2- Peser 450g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur.

3- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant 90 s.

4 - Arrête le malaxeur pendant 15 s.

5- Ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au-delà de la zone de malaxage.

6 - Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

7- La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive ; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et vient effectuer avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

8- Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base. Le temps zéro est celui Où l'eau est ajoutée au ciment.

9- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~10 -15 mn) jusqu'à ce que $d=4 \text{ mm} \pm 1\text{mm}$. Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné. - Retourner le moule tronconique du ciment déjà utilisé pour l'essai de début de prise. Ainsi, les essais de fin de prise soient faits l'autre face de l'échantillon.

9 - Munir l'aiguille d'un accessoire annulaire pour faciliter l'observation des faibles pénétrations de l'aiguille.

10 - Enregistrer à 15 min près, le temps au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois qu'à 0.5 mm dans l'éprouvette. Le temps de

fin de prise du ciment étudié est le temps au bout duquel l'accessoire annulaire cesse de laisser une trace sur l'éprouvette.

3.4. Formulation des mortiers :

Pour la détermination de la résistance à la traction en flexion et en compression, et pour déterminer la variation linéique du mortier, on a utilisé des éprouvettes de forme prismatiques 4×4×16 cm. Les mortiers ont été préparés avec une gâchée qui comporte : 450 g de ciment, 1350 g de sable et 225 g d'eau. Le rapport E/C est égal à 0.5 (constant). Le sable utilisé pour la formulation de mortier est un sable fin ($d < 2$ mm).

Tableau 3.5. Différentes combinaisons de mortier.

Désignation	Liant (CEM II + brique)	Sable (g)	Eau (g)	E/L
M1 (témoin)	450 g CEM II (100%)	1350	225	0,50
M2	405 g CEM II + 45 g brique (90/10%)	1350	225	0,50
M3	360 g CEM II + 90 g brique (80/20%)	1350	225	0,50
M4	315 g CEM II + 135 g brique (70/30%)	1350	225	0,50

- 1- Peser la quantité de sable
- 2- Peser la quantité de ciment à tester
- 3- Réaliser l'opération de malaxage
- 4- Après le malaxage, le mortier est introduit dans les moules (trois éprouvettes).
- 5- Réaliser l'opération de serrage (vibration) à l'aide de l'appareil à chocs.
- 6- Araser les moules pour enlever le surplus du mortier
- 7- Démoulage des échantillons après 24 heures
- 8- Entreposer les échantillons dans l'eau à 20 ± 1 °C jusqu'au moment de l'essai de rupture.



Figure 3.4.les éprouvettes avant le démoulage.

❖ Essai de flexion :

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

La formule de la RDM pour le calcul de la contrainte de flexion est donnée comme suit :

$$R_f = \frac{M}{I} y$$

Avec :

M : moment de flexion,

$$M = \frac{PL}{4} \quad (L = 3a)$$

I : moment d'inertie de la section transversale,

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12}$$

Y : distance de la fibre la plus éloignée à l'axe neutre,

$$y = \frac{a}{2} \text{ d'où : } R_f = \frac{9P}{2a^2}$$

Où :

R_f : est la résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré (MPa);

a : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

❖ Essai de compression :

Il consiste à comprimer l'éprouvette avec une force croissante jusqu'à l'apparition de fissures afin de déterminer sa résistance à la compression et donc si le matériau est capable de résister à la charge prévue. On utilise des machines à compression ou presses à éprouvettes pour réaliser ce test.

La contrainte de compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ (MPa)}$$

Avec :

F_c : Charge maximale de rupture (N).

A : l'aire de la section d'application de la force de compression (1600 mm²).

❖ Essai de retrait et de gonflement :

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes de mortier normal. Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon de longueur $L = 160 \text{ mm}$

$$l = L + \Delta dl(t)$$

Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ;

L'éprouvette a une longueur au temps considéré :

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine.

La variation de longueur au temps t sera :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

3.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents essais réalisés en laboratoire universitaire sur quatre types de ciment, à base de déchets de briques broyées en substitution partielle du CEM II, afin de vérifier les qualités du ciment présentant des propriétés utiles du point de vue économique et sécuritaire à la fois.

CHAPITRE 4 :

RESULTATS

ET

DISCUSSIONS

4.1.Introduction :

Ce chapitre présente les résultats des essais réalisés sur les différentes formulations de ciments (C1, C2, C3 et C4), à base de déchets de briques broyées en substitution partielle du CEM II, ainsi que sur les mortiers correspondants (M1, M2, M3 et M4). Une analyse comparative approfondie est effectuée pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques des ciments et des mortiers testés. Les commentaires détaillés sur les résultats permettent de comprendre les forces et les faiblesses de chaque formulation, offrant ainsi un aperçu précieux sur la valorisation des déchets de briques broyées dans les applications pratiques du domaine de la construction et de l'ingénierie.

4.2.Les résultats expérimentaux :**4.2.1.Essais à l'état anhydre :****❖ Essai de la masse volumique apparente :**

Le tableau 4.1 et la figure 4.1 présente les valeurs de la masse volumique apparente de chaque ciment (C1-C4).

Tableau 4.1. Valeurs de masse volumique apparente.

Formulation	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Ciment 1 (témoin)	1,30
Ciment 2 (10 % brique)	1,21
Ciment 3 (20 % brique)	1,15
Ciment 4 (30 % brique)	1,05

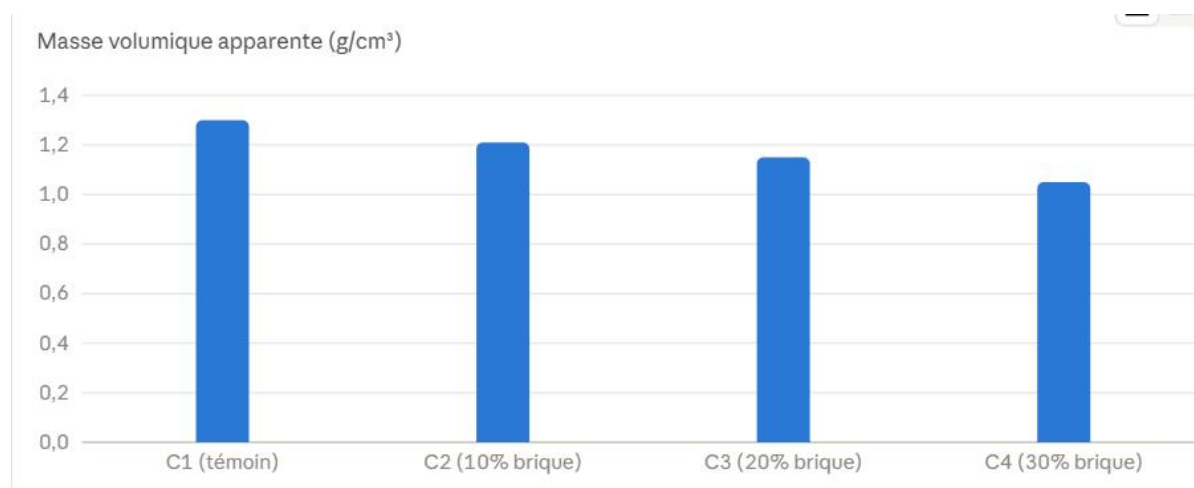


Figure 4.1. Valeurs de masse volumique apparente des ciments.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la masse volumique apparente des différents ciments étudiés restent relativement proches et

comparables entre elles. Aucune variation importante n'est observée entre le ciment témoin C1 et les formulations contenant des déchets de briques broyées. Cette faible variation peut être liée au remplacement partiel du ciment par les déchets de briques broyées, dont les caractéristiques physiques diffèrent de celles du ciment. Ainsi, malgré l'augmentation progressive du taux de substitution de 10 % à 30 %, les valeurs mesurées demeurent du même ordre de grandeur, traduisant une influence limitée de l'ajout de briques broyées sur la masse volumique apparente des ciments étudiés.

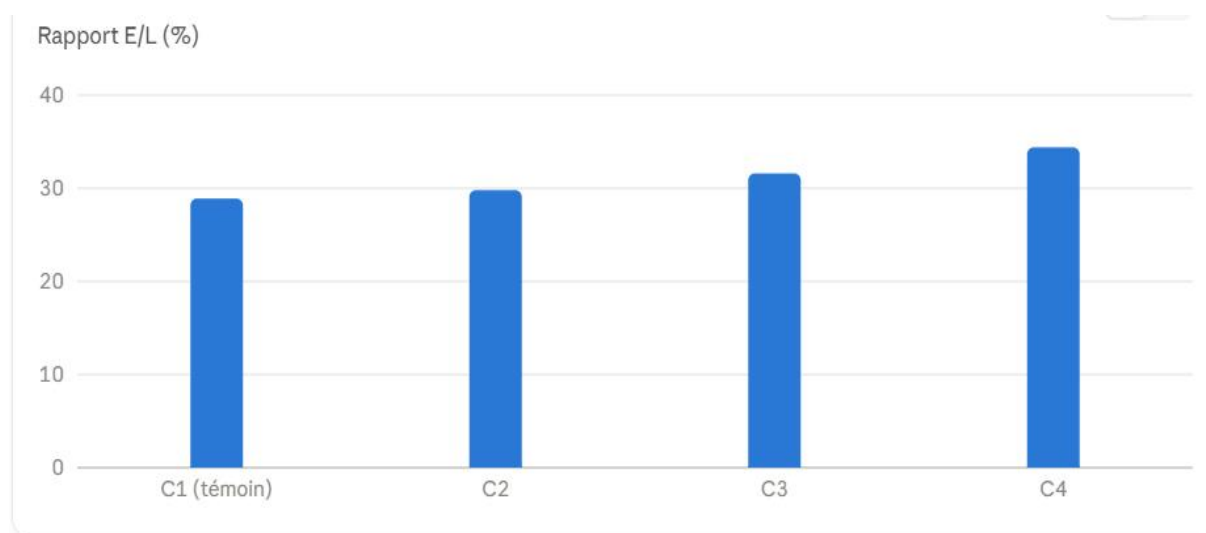
4.2.2.Essais à l'état hydraté :

❖ Essai de consistance :

Le tableau 4.2 Et la figure 4.2 présentent les différentes valeurs du rapport (E/C) pour chaque type de ciments

Tableau 4.2 Valeurs de rapport (E/L) en (%).

ciment	Rapport E/L
Ciment 1 (témoin)	28,9 %
Ciment 2	29,8 %
Ciment 3	31,6 %
Ciment 4	34,4 %

**Figure 4.2. Résultats de rapport E/L (%)**

On remarque que le rapport E/C augmente progressivement avec le taux de substitution en déchets de briques broyées, passant de 28,9 % pour le ciment C1 (témoin) à 34,4 % pour le ciment C4 (30 % de briques broyées). On constate ainsi que l'augmentation du pourcentage de déchets

de briques broyées dans le ciment accroît la quantité d'eau de gâchage nécessaire.

Cette augmentation est plus marquée entre les ciments C3 et C4, où le rapport E/C passe de 31,6 % à 34,4 %, ce qui traduit une demande en eau plus élevée liée à l'incorporation des déchets de briques broyées, probablement en raison de leur finesse et de leur porosité plus importantes que celles du CEM II.

❖ Essai de prise :

Le tableau 4.3 et la figure 4.3 présentent le temps de début et fin de prise pour les différents ciments :

Tableau 4.3. Temps de début et de fin de prise.

Formulation	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Temps de prise (min)
Ciment 1 (témoin)	<i>65</i>	<i>205</i>	<i>140</i>
Ciment 2 (10 % brique)	<i>80</i>	<i>220</i>	<i>140</i>
Ciment 3 (20 % brique)	<i>95</i>	<i>235</i>	<i>140</i>
Ciment 4 (30 % brique)	<i>115</i>	<i>250</i>	<i>135</i>

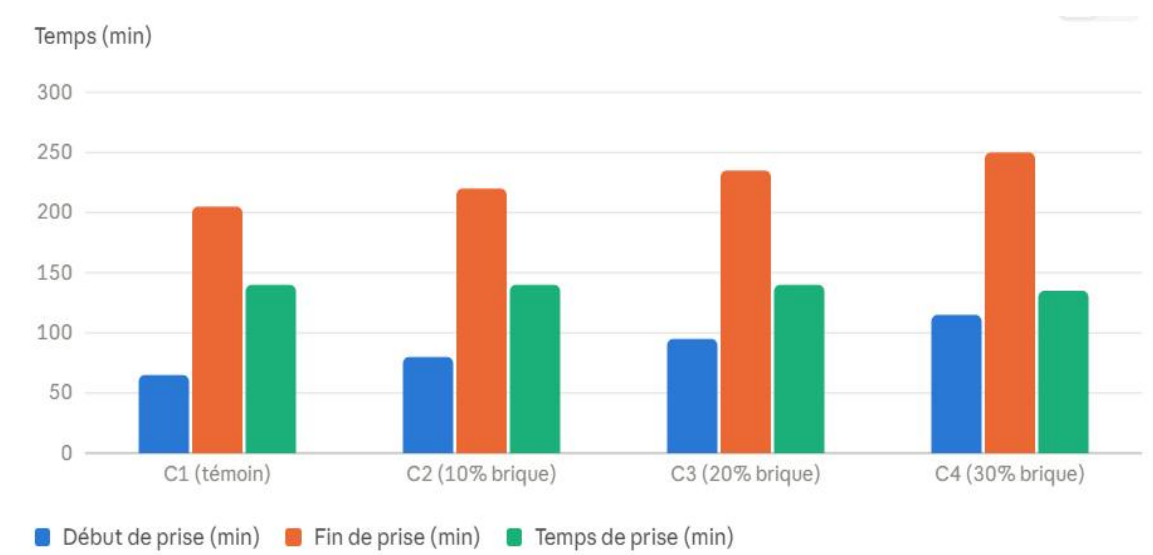


Figure 4.3. Temps de début et de fin de prise des différents ciments.

On remarque que le début de prise augmente progressivement pour les ciments C2, C3 et C4 par rapport au ciment C1 (témoin), passant de 65 min à 115 min pour un taux de substitution allant jusqu'à 30 % de déchets de briques broyées, et cela est dû à l'effet des déchets de briques broyées sur l'hydratation du ciment.

Le temps de prise reste globalement stable (140 min) pour les ciments C1, C2 et C3, puis diminue légèrement de 5 min pour le ciment C4 (135 min) par rapport au ciment témoin.

On peut ainsi dire que les déchets de briques broyées retardent le début et la fin de prise, sans modifier significativement la durée totale de prise, sauf pour le taux de substitution le plus élevé (30 %).

4.3.Essai sur les mortiers :

❖ Essai de flexion :

Le tableau 4.4 et la figure 4.4 présentent l'évolution de la résistance à la flexion à 2j , 14j et 28j et 90j des différents mortiers étudiés.

Tableau 4.4. Résultats de la résistance à la flexion à 2j, 7j, et 28 j et 90 .

Formulation	Rf 2j (MPa)	Rf 7j (MPa)	Rf 28j (MPa)	Rf 90j* (MPa)
Ciment 1 (témoin)	<i>1,9</i>	<i>2,6</i>	<i>3,4</i>	<i>4,1</i>
Ciment 2 (10 % brique)	<i>1,6</i>	<i>2,2</i>	<i>2,9</i>	<i>3,5</i>
Ciment 3 (20 % brique)	<i>1,3</i>	<i>1,9</i>	<i>2,5</i>	<i>3,0</i>
Ciment 4 (30 % brique)	<i>1,0</i>	<i>1,5</i>	<i>2,1</i>	<i>2,6</i>

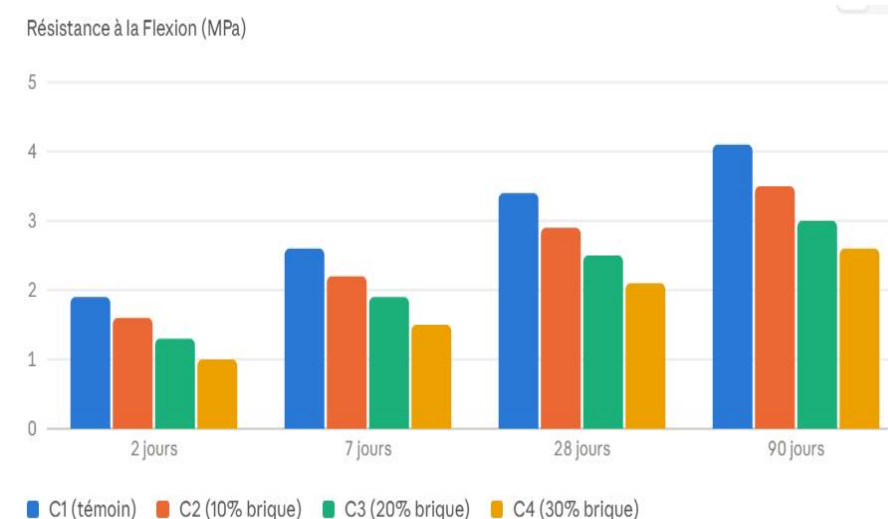


Figure 4.4 Résistance à la flexion à 2j, 7j et 28 j et 90j.

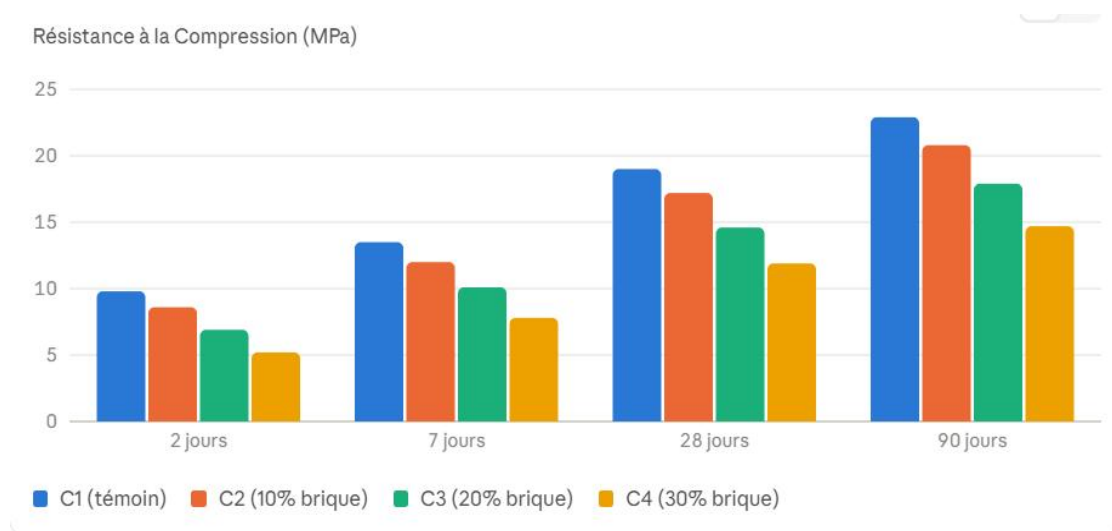
On remarque l'augmentation de la résistance à la flexion au cours du temps pour l'ensemble des mortiers testés. Les mortiers à base des ciments C2 et C3 donnent des résultats plus faibles par rapport aux autres mortiers, tandis que le mortier M4 affiche des résultats acceptables mais qui restent inférieurs aux résultats de résistance du mortier témoin M1.

❖ Essai de compression :

Le tableau 4.5 et la figure 4.5 présentent l'évolution de la résistance à la compression à 2 j 7 j et 28 j 90 j des différents mortiers

Tableau 4.5. Résultats de la résistance à la compression à 2 j 7 j**et 28 j 90j**

Formulation	Rc 2j (MPa)	Rc 7j (MPa)	Rc 28j (MPa)	Rc 90j* (MPa)
Ciment 1 (témoin)	9,8	13,5	19,0	22,9
Ciment 2 (10 % brique)	8,6	12,0	17,2	20,8
Ciment 3 (20 % brique)	6,9	10,1	14,6	17,9
Ciment 4 (30 % brique)	5,2	7,8	11,9	14,7

**Figure 4.5. les résultats de la Résistance à La Compression.**

Pour la résistance à la compression à 2, 7, 28 et 90 jours, on constate les mêmes remarques que pour l'évolution de la résistance à la flexion.

On peut constater qu'un taux de substitution de 30 % de déchets de briques broyées diminue la résistance mécanique du ciment. La résistance à 28 jours diminue de 9,5 % et 37,4 % avec l'augmentation du pourcentage de briques broyées de 10 % à 30 % respectivement, par rapport au ciment témoin C1.

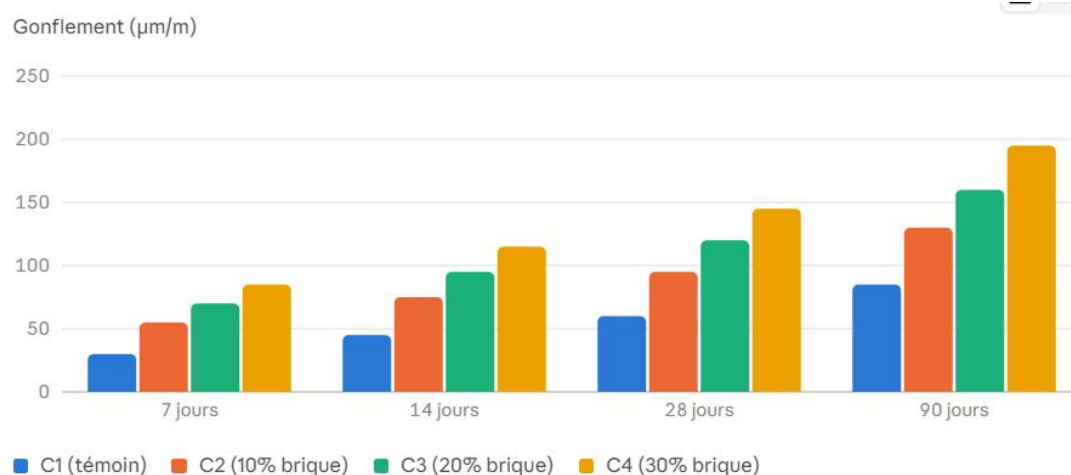
Les mortiers à base de ciment avec ajout de déchets de briques broyées affichent des valeurs de résistance plus faibles, notamment au jeune âge (2 et 7 jours), et cet écart tend à se réduire légèrement à long terme (28 et 90 jours), ce qui traduit une activité progressive de l'ajout au cours du temps.

❖ Essai de Gonflement :

Le tableau 4.6 et la figure 4.6 présentent le gonflement à 7 j, 14j et 28 j 90 j des différents mortiers.

Tableau 4.6. Valeurs de l'essai de gonflement à 7j,14j et 28 j 90 j

Formulation	Gonflement 7j ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Gonflement 14j ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Gonflement 28j ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Gonflement 90j* ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Ciment 1 (témoin)	30	45	60	85
Ciment 2 (10 % brique)	55	75	95	130
Ciment 3 (20 % brique)	70	95	120	160
Ciment 4 (30 % brique)	85	115	145	195

Figure 4.6. Gonflement ($\mu\text{m}/\text{mm}$) à 7j, 14j et 28 j.

On remarque que toutes les éprouvettes élaborées avec les ciments C1 à C4 affichent une augmentation de gonflement.

L'éprouvette élaborée avec le ciment C4 marque les valeurs les plus significatives de gonflement, cela est dû au taux élevé de déchets de briques broyées (30 %), sachant que cet ajout augmente la demande en eau et la porosité du ciment.

L'effet des déchets de briques broyées sur le gonflement du ciment peut être lié à leur interaction avec les produits issus de l'hydratation du ciment. La présence de particules fines de briques broyées peut modifier la structure de la pâte de ciment et influencer la formation et la répartition des produits hydratés. Cette modification de la microstructure peut avoir une influence sur les variations dimensionnelles du matériau au cours du temps.

❖ Essai de Retrait :

Le tableau 4.7 et la figure 4.7 présentent le retrait à 7 j, 14j et 28 j 90 j des différents mortiers

Tableau 4.7. Valeurs de l'essai de Retrait à 7j,14j et 28 j 90 j

Formulation	Retrait 7j ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Retrait 14j ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Retrait 28j ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Retrait 90j* ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Ciment 1 (témoin)	210	280	340	450
Ciment 2 (10 % brique)	230	300	365	480
Ciment 3 (20 % brique)	250	325	395	520
Ciment 4 (30 % brique)	275	355	430	560



Figure 4.7. Les Résultats De l'essai de Retrait.

On remarque que toutes les éprouvettes affichent une augmentation de retrait au cours des jours. Une valeur significative de retrait est affichée pour l'éprouvette élaborée avec le ciment C4, cette valeur augmentant progressivement avec le taux de substitution en déchets de briques broyées (C2, C3, puis C4).

On constate que l'ajout de déchets de briques broyées augmente le retrait par rapport au ciment témoin C1.

Les principales remarques relatives au retrait observé pour les différents ciments étudiés sont :

- Le retrait augmente avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau de pores capillaires au sein des amas d'hydrates formés, ainsi qu'à la dessiccation.
- Les retraits des ciments avec ajout de déchets de briques broyées sont supérieurs à ceux du ciment témoin. Ceci peut s'expliquer par la porosité plus importante de la pâte de ciment hydraté liée à l'incorporation de cet ajout, ainsi qu'à la formation d'un C-S-H secondaire.
- On remarque aussi que la vitesse de retrait est relativement lente jusqu'à 7 jours et s'accélère entre l'âge de 7 et 28 jours.

4.4.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné les résultats des essais effectués sur quatre formulations de ciment différentes, à savoir C1, C2, C3 et C4, à base de déchets de briques broyées en substitution partielle du CEM II. Les essais ont porté sur plusieurs propriétés importantes des ciments et des mortiers correspondants, telles que la masse volumique apparente, le rapport E/C, la prise, la flexion, la compression, le gonflement et le retrait. Les essais sur les mortiers ont été réalisés en utilisant un sable fin, afin d'évaluer l'influence de l'incorporation des briques broyées sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

Ce travail a pour but d'étudier différentes formulations de ciment ternaire à base de déchets de brique en les comparant avec un ciment témoin CEM II A/L 42.5 N. Les résultats de cette étude nous montrent que :

- Les ajouts dans le ciment donnent des valeurs comparables de la masse volumique apparente que le ciment témoin un petit changement due à la réorganisation des grains de déchets de briques.
- Les ciments à base de déchets de briques broyées et calcaire nécessitent une quantité d'eau de gâchage plus élevée qu'un ciment au calcaire seul, cela est due à la présence des éléments fins la poudre de brique.
- L'ajout de déchets de briques dans le ciment retarde le début et la fin de prise.
- L'ajout de briques broyées augmente le gonflement et le retrait de ciment. vue la propriété pozzolanique de la poudre de brique, elle ne réagit pas directement avec l'eau pour durcir. Elle doit attendre que le ciment s'hydrate et libère de la chaux libre.
- La résistance à la compression : Elle peut s'améliorer ou rester acceptable à un taux de substitution approprié, puis diminuer lorsque ce taux augmente de manière significative, en raison de la réduction de la quantité de CEM II.
- La résistance à la flexion : Cela peut varier en fonction de la proportion de briques ; le maintien de la résistance est généralement meilleur pour de faibles taux de substitution.

Dans notre cas, on peut dire que le remplacement de 10 % de ciment par la poudre de brique donne les meilleurs résultats

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, l'étude montre que l'utilisation des déchets de brique peut modifier certaines caractéristiques physico-chimiques du ciment, notamment son temps de prise, sa résistance mécanique et sa plasticité ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour leur utilisation dans l'industrie du ciment.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AFNOR. NF EN 197-1 : Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Paris : AFNOR, 2012.
- [2] AFNOR. NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances. Paris : AFNOR, 2016.
- [3] AFNOR. NF EN 196-3 : Méthodes d'essai des ciments – Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité. Paris : AFNOR, 2017.
- [4] SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 114, p. 2–26. DOI : 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
- [5] PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, n°5, p. 832–838. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023.
- [6] BENAMAR, S., KAMECHE, Z. E. A., HOUMADI, Y., AISSA MAMOUNE, S. M. Étude de comportement physique et mécanique des mortiers à base de déchet de brique. *Communication Science et Technologie*, 2022, vol. 20, n°2, p. 09–22.
- [7] NACERI, A., CHIKOUCHE HAMINA, M. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, 2009, vol. 29, n°8, p. 2378–2384. DOI : 10.1016/j.wasman.2009.03.026.
- [8] BARKAT, A. Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton. Mémoire de Magister en génie civil, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2006.
- [9] BOUKHADA et al. Renforcement de mortier de ciment à base de déchets de briques par des fibres hybrides. Référence bibliographique à compléter à partir du document original utilisé dans le mémoire.
- [10] BEKTAS, F., WANG, K. Performance of ground clay brick in ASR-affected concrete: Effects on expansion, mechanical properties and ASR gel chemistry.
- [11] RAKHIMOVA, N. R., RAKHIMOV, R. Z. Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste.

Materials & Design, 2015, vol. 85, p. 324–331. DOI : 10.1016/j.matdes.2015.06.182.

WEBOGRAPHIE

- 1.<https://www.afnor.org/AFNOR> – Association française de normalisation.
- 2.<https://asjp.cerist.dz/ASJP> – Algerian Scientific Journal Platform.
- 3.<https://www.sciencedirect.com/ScienceDirect> – Elsevier.
- 4.<https://www.cerist.dz/CERIST> – Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique.
- 5.<https://www.univ-ouargla.dz/Université Kasdi Merbah Ouargla>. Site officiel de l'université et plate-forme de consultation des travaux universitaires.
- 6.<https://www.univ-skikda.dz/Université 20 Août 1955 – Skikda>. Site officiel de l'université et ressources relatives aux travaux scientifiques et universitaires.
- 7.<https://www.google.com/scholar> Google Scholar.