

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux En Génie Civil

Par

- **Rachid ALOUANI**
- **Boubakeur KHALFAOUI**

Intitulé

Etude de l'influence des déchets industriels sur les propriétés physico-mécaniques du mortier à l'aide du plan de mélange

Soutenu le : Juin 2022

Devant le Jury composé de :

<i>M.BECHICHE Said</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.MESSAOUDENE Ibrahim</i>	<i>Professeur</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.TABET Souad</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.BENOUADAH Abdelatif</i>	<i>M.C.B</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخواص الفيزيائية-الميكانيكية للملاط الأسمنتي الذي يحتوي على إضافات دقيقة من نفايات الصناعية (نفايات الطوب DB ، مسحوق الرخام PM ، وخبث خبث الفرن العالي الحبيبي LHF) يتم استخدام خطة خلط ثلاثية العوامل لنمذجة تأثير الإضافات الثلاثة على خصائص الملاط في الحالة الطازجة والمتصلبة. تمت دراسة الكثافة والمقاومات الميكانيكية (الضغط والانحناء عند 7 و 28 و 60 يوم). العوامل الثلاثة (DB ، PM ، LHF) مأخوذة بنسب كتلية ، مجموعها يساوي الوحدة مع استبدال الأسمنت الذي يصل إلى 30% ؛ مما يعني أن هذه العوامل تعتمد على بعضها البعض وبالتالي فإن المجال التجريبي مقيد بالعلاقة : نفايات الطوب (%) + مسحوق الرخام (%) + خبث الفرن العالي (%) = 100%. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن تركيب الملاط على أساس الأسمنت البورتلاندي مع حشو نفايات صناعية يجعل من الممكن تصنيع ملاط اقتصادي مع الحفاظ على الخصائص الميكانيكية المقبولة. يتم الحصول على أفضل النتائج لمزيج يجمع بين الخبث ونفايات الطوب ومسحوق الرخام. تستفيد المقاومة من التأثيرات قصيرة المدى بسبب وجود مسحوق الرخام والتفاعلية متوسطة المدى للطوب والهيدروليكية طويلة المدى لخبث الفرن العالي.

الكلمات المفتاحية: الخواص الفيزيائية-الميكانيكية، نفايات الطوب، مسحوق الرخام، خبث الفرن العالي، الإسمنت.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de ciments contenant des ajouts fins provenant de déchets industriels (briques DB, poudre de marbre PM et laitier granulé de haut fourneau LHF). Un plan de mélange à trois facteurs est utilisé afin de modéliser l'influence des trois ajouts sur les propriétés du mortier aux états frais et durci. La densité et les résistances mécaniques (Compression et flexion à 7, 28 et 60 jours) sont étudiées. Les 3 facteurs (DB, PM et LHF) pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution du ciment qui va jusqu'à 30% ; ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est donc contraint par la relation : DB (%) + PM (%) + LHF (%) = 100 %. Les résultats obtenus montrent que la formulation des mortiers à base de ciment Portland avec fillers de déchets industriels, permet de fabriquer des mortiers économiques tout en conservant des propriétés mécaniques acceptables. Les meilleurs résultats sont obtenus pour un mélange associant laitier, déchet de brique et poudre de marbre. Les résistances bénéficient des effets à court terme dus à la présence de la poudre de marbre, de la réactivité de la brique à moyen terme et de l'hydraulicité à long terme du laitier.

Mots Clés : Propriétés physico-mécanique, déchets de brique, poudre de marbre, laitier, ciment.

Abstract

The objective of this work is to study the physico-mechanical properties of cement-based mortars containing fine additions from industrial waste (DB bricks, PM marble powder and LHF granulated blast furnace slag). A three-factor mixing plan is used to model the influence of the three additions on the properties of the mortar in the fresh and hardened states. The density and the mechanical resistances (Compression and bending at 7, 28 and 60 days) are studied. The 3 factors (DB, PM and LHF) taken in mass proportions, the sum of which is equal to unity with a substitution of cement which goes up to 30%; which means that these factors are dependent on each other. The experimental domain is therefore constrained by the relationship: DB (%) + PM (%) + LHF (%) = 100%.

The results obtained show that the formulation of mortars based on Portland cement with industrial waste fillers, makes it possible to manufacture economical mortars while maintaining acceptable mechanical properties. The best results are obtained for a mixture combining slag, brick waste and marble powder. The resistances benefit from the short-term effects due to the presence of the marble powder, the medium-term reactivity of the brick and the long-term hydraulicity of the slag.

Keywords: Physico-mechanical, waste bricks, marble powder, slag, cement.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste mémoire

- ✓ A nos chers parents.
- ✓ A nos chers frères et sœurs.
- ✓ A nos amis et collègues.
- ✓ A tous nos proches.
- ✓ A tous ceux qui nous aiment.
- ✓ A tous ceux qui nous aimons.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Pr. MESSAOUDENE Ibrahim, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. A tout le personnel du :

Laboratoire de Génie Civil de l'université de B.B.Arreridj, Mrs
CHETOUAH Farid et Mr DJENDI Zoubir

Laboratoire de la cimenterie d'AIN- LEKBIRA (Sétif)

A tous ceux qui ont contribué dans notre formation de près ou de loin : nos enseignants à l'Université, qu'ils trouvent ici le témoignage de notre gratitude.

SOMMAIRE

Résumé.....	i
Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Sommaire.....	iv
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii

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

Chapitre 1. Etude Bibliographique.....	2
1.1. Introduction.....	2
1.2. Le béton.....	2
1.3. Les ajouts cimentaires.....	3
1.4. La poudre de marbre.....	3
1.4.1 Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments.....	4
1.4.2. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques.....	5
1.4.3. Effet de la poudre de marbre sur la porosité.....	5
1.4.4. Réactivité indirecte de la poudre de marbre.....	5
1.4.5. Réactivité directe de la poudre de marbre.....	6
1.4.6. Effet des fillers de marbre sur les aspects rhéologiques.....	6
1.5. Déchet de brique.....	8
1.5.1. Définition de la brique.....	8
1.5.2. Types de brique.....	8
1.5.3. Valorisation des déchets de brique.....	9
1.5.4. Propriétés des bétons des déchets de brique.....	10
1.5.5. Avantages et inconvénients d'utilisation des briques.....	11
1.5.6. Propriétés des bétons des déchets de brique.....	11
1.6. Le laitier de haut fourneau.....	12
1.6.1. Définition.....	12
1.6.2. Les principales formes de laitier.....	13
1.6.3. L'effet chimique et effet physique du laitier granulé.....	16
1.6.4. L'hydratation du laitier granulé de hauts fourneaux.....	17
1.6.5. Utilisation des laitiers de haut fourneau en cimenterie.....	18
1.6.6. Effet de l'ajout du laitier de haut fourneau sur le béton.....	19
1.7. Conclusion.....	20

Chapitre 2. Etude Expérimentale.....	21
2.1. Introduction.....	21
2.2. Matériaux.....	21
2.2.1. Ciment.....	21
2.2.2. La poudre de marbre (PM).....	22

2.2.3. Le Déchet de brique (DB).....	23
2.2.4. Laitier de haut fourneau (LHF).....	23
2.2.5. Le Sable normalisé	24
2.3. Formulation Standard du Mortier.....	25
2.4. Confection des éprouvettes de mortier.....	26
2.5. Essais mécaniques.....	29
2.5.1. Résistance à la traction par flexion.....	29
2.5.2. Résistance à la compression.....	31
2.6. Conclusion.....	32
Chapitre 3. Résultats et Discussions.....	33
3.1 Introduction.....	33
3.2. Rappel sur la formulation des mortiers.....	33
3.3 Evolution des masses volumiques.....	34
3.4 Evolution des résistances mécaniques.....	35
3.5. Analyse des résistances à la compression.....	37
3.5.1. Analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 7jours.....	37
3.5.2. Analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 28jours.....	39
3.5.3. Analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 60jours.....	42
3.6. Conclusion.....	44
Conclusion générale et perspectives.....	45
Références bibliographiques	

Liste des Tableaux

Chapitre 1	
Tableau 1.1. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de poudre de marbre.....	7
Tableau 1.2. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de déchet de brique.....	12
Tableau 1.3. Propriétés du béton au laitier granulé.....	14
Tableau 1.4. Composition chimique du laitier granulé.....	18
Tableau 1.5. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de laitier.....	19
Chapitre 2	
Tableau 2.1. Propriétés du ciment utilisé CEM I (CPA 42.5 R).....	22
Tableau 2.2. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	22
Tableau 2.3. Composition chimique de la poudre de marbre (XRF).....	22
Tableau 2.4. Composition chimique de la poudre de déchet de brique (XRF).....	23
Tableau 2.5. Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau.....	24
Tableau 2.6. Composition chimique du laitier de haut fourneau (XRF).....	24
Tableau 2.7. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.....	25
Tableau 2.8. Formulations du mortier standard selon un plan de mélange.....	26
Tableau 2.9. Opérations de malaxage des mortiers.....	27
Chapitre 3	
Tableau 3.1. Compositions des différents mortiers.....	34
Tableau 3.2. Masse des différents mortiers.....	35
Tableau 3.3. ANOVA pour la résistance à la compression à 7 jours.....	37
Tableau 3.4. ANOVA pour la résistance à la compression à 28 jours.....	39
Tableau 3.5. ANOVA pour la résistance à la compression à 60 jours.....	42

Liste des Figures

Chapitre 1	
Figure 1.1. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de poudre de marbre.....	8
Figure 1.2. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de déchet de brique.....	12
Figure 1.3. Laitiers cristallisés et vitrifiés.....	13
Figure 1.4. Les principales formes minéralogiques du laitier.....	13
Figure 1.5. Echantillons de laitier granulé et bloc de laitier cristallisé.....	16
Figure 1.6. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de laitier.....	20
Chapitre 2	
Figure 2.1. Echantillon de ciment CEM I (CPA 42.5 R).....	21
Figure 2.2. Echantillon de poudre de marbre.....	22
Figure 2.3. Echantillon de déchet de brique.....	23
Figure 2.4. Echantillon de laitier de haut fourneau.....	23
Figure 2.5. Echantillon de sable normalisé.....	24
Figure 2.6. Substitution de ciment par des ajouts minéraux.....	25
Figure 2.7. Le malaxeur à mortier.....	27
Figure 2.8. Coulage du mortier dans les moules 4x4x16.....	28
Figure 2.9. Table à choc spécifique à la fabrication des mortiers.....	28
Figure 2.10. Echantillons des éprouvettes de mortiers après le coulage.....	29
Figure 2.11. Principe de la flexion 3 points.....	30
Figure 2.12. Essai et rupture en Flexion.....	31
Figure 2.13. Le principe de l'essai à la compression du mortier.....	32
Figure 2.14. Essai et rupture en compression.....	32
Chapitre 3	
Figure 3.1. Courbe ternaire des dix (10) mortiers à trois (3) paramètres.....	33
Figure 3.2. Evolution de la masse volumique des différents mortiers.....	35
Figure 3.3. Evolution des résistances à la flexion.....	36
Figure 3.4. Evolution des résistances à la compression.....	36
Figure 3.5. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 7jours.....	39
Figure 3.6. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 7jours.....	39
Figure 3.7. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 28 jours.....	41
Figure 3.8. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 28 jours.....	41
Figure 3.9. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 60 jours.....	44
Figure 3.10. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 60 jours.....	44

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La préoccupation majeure de l'industrie cimentière pour palier aux problèmes liés à la fabrication du ciment Portland, consiste à produire un ciment de qualité, à un coût concurrentiel et dans le respect des normes environnementales, en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles.

La plupart des fabricants cherchent à obtenir des ciments exigeant pour leur confection un apport de plus en plus faible d'énergie calorifique et mécanique et incorporant à cet effet toute une série de produits nouveaux naturels ou artificiels à caractère hydraulique ou pouzzolanique, tels que la fumée de silice, le laitier, la pouzzolane et la cendre volante [1].

L'emploi de certaines additions minérales dans la confection du béton contribue à une accélération du processus d'hydratation du ciment. Ceci engendre une modification de certaines propriétés du ciment à savoir le temps de prise, l'apparition des microfissures et l'évolution des résistances mécaniques à très jeune âge. Ces modifications des propriétés physico-chimiques des composants du béton dues à des additions minérales affectent directement les propriétés rhéologiques du béton frais et ses composants. En effet, cela peut conduire à une mise en place facile ou difficile du béton.

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de ciments contenant des ajouts fins provenant de déchets industriels (briques DB, poudre de marbre PM et laitier granulé de haut fourneau LHF). Un plan de mélange à trois facteurs est utilisé afin de modéliser l'influence des trois ajouts sur les propriétés du mortier aux états frais et durci. La densité et les résistances mécaniques (Compression et flexion à 7, 28 et 60 jours) sont étudiées.

Notre travail est scindé en 03 chapitres précédés par une introduction générale et se termine par une conclusion générale et perspective. Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les ajouts cimentaires (laitier, déchet de brique et poudre de marbre) et leurs effets sur les propriétés des ciments et bétons. Le deuxième chapitre porte sur l'identification et la caractérisation des matériaux et les procédures expérimentales et enfin le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et discussions.

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1. Etude Bibliographique

1.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter une synthèse bibliographique sur les ajouts cimentaires utilisés dans notre projet à savoir : le laitier granulé de haut fourneau, le déchet de brique et la poudre de marbre. Leurs effets sur les propriétés des ciments et bétons sont mises en évidence.

1.2. Le béton

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre (sable, gravier, cailloux) et le liant est un ciment, généralement un ciment portland avec ou sans ajouts. Les composants sont très différents :

Le Ciment : c'est le liant qui réagit chimiquement avec l'eau (réaction d'hydratation), devenir résistant, et ainsi coller tous les granulats entre eux.

Les granulats : constituent le squelette qui avec une disposition plus ou moins ordonnée confèrent au béton sa résistance.

Le sable : il permet de remplir les vides qui subsistent entre les gros granulats.

L'eau de gâchage : c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange maniable.

Toutes les opérations de mise en œuvre (formulation, préparation du béton frais, transport et la mise en place) sont importantes si l'on veut obtenir un béton compact, de bonne qualité et encore homogène.

Pour être durable, le béton doit être :

- Correctement formulé.
- Soigneusement mis en œuvre
- Protégé des causes possibles d'altération.

1.3. Les ajouts cimentaires

Les ajouts minéraux (cimentaires) sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton [2].

Des ajouts, tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, les fillers etc... entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire, ternaire ou quaternaire [2].

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits industriels, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant leur but d'ajouts cimentaires et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actif [2]:

- Les ajouts minéraux actifs : Les ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment libérée lors de l'hydratation du clinker pour former des compositions difficilement solubles qui contribuent à la résistance du ciment. Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.
- Les ajouts minéraux inertes : comme les fillers calcaires ; l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance et la rhéologie des bétons.

1.4. La poudre de marbre

Le marbre est une roche calcaire de texture assez dense, à tissu compact ou cristallin. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Ces couleurs proviennent essentiellement d'oxydes métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il provient, est uniquement composée de calcite [1].

Le marbre a été couramment utilisé comme matériau de construction depuis les temps anciens. Par conséquent, les déchets de marbre en tant que sous-produits sont des matériaux très importants qui nécessitent un effort d'élimination environnemental adéquat. De plus, le recyclage des déchets sans gestion adéquate peut entraîner des problèmes environnementaux plus importants que les déchets eux-mêmes.

La poudre de marbre est un déchet produit lors de la production de marbre. Une grande quantité de poudre est générée pendant le processus de coupe. Le résultat est qu'environ 25% de la masse de marbre d'origine est perdue sous la forme de poussière. Laisser ces déchets directement dans l'environnement peut causer des problèmes environnementaux tels que l'augmentation de l'alcalinité du sol, affecter les plantes, affecter le corps humain, etc. La poudre de marbre, un déchet solide généré par le traitement du marbre peut être utilisé comme matériau de remplissage dans le ciment ou les granulats fins lors de la préparation du béton. La poudre de marbre peut être utilisée comme adjuvant dans le béton, de sorte que la résistance du béton peut être augmentée.

La poudre de marbre qui ajoutés au ciment Portland peuvent en général accélérer l'hydratation du ciment avec comme conséquence, une amélioration des résistances à la compression au jeune âge. Du point de vue chimique, la poudre de marbre n'a pas des propriétés pouzzolaniques, mais dans certains cas selon la nature du ciment, elle peut réagir avec les aluminates du ciment.

1.4.1 Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments

Grâce à une granulométrie appropriée, la poudre de marbre agit principalement par ses propriétés physiques sur certaines qualités du ciment [2]:

- Accroissement de maniabilité.
- Diminution de perméabilité.
- Diminution de capillarité.
- Réduction des fissures.
- Augmentation de cohésion.
- Accélérer l'hydratation du ciment au jeune âge.

1.4.2. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques

La poudre de marbre incorporée dans un béton modifie le squelette granulaire du mélange et peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliore. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente. Cet accroissement de la résistance est dû à l'effet filler (remplir les vides) de la poudre de marbre [2].

1.4.3. Effet de la poudre de marbre sur la porosité

Les fillers de la poudre de marbre auraient tendance à modifier la densité des silicates de calcium hydratés (C-S-H). En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du CaCO_3 (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de CaCO_3 et de C3S anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de C3S incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de CaCO_3 [3]. À un certain degré d'hydratation, une pâte de C3S ne contenant pas de CaCO_3 a une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15% de CaCO_3 peut posséder une porosité plus faible, due à des degrés différents d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans CaCO_3 [4].

1.4.4. Réactivité indirecte de la poudre de marbre

L'addition de CaCO_3 augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique. Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue. Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le di-chlorure de calcium mais sans toutefois diminuer la période d'induction. L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en CaCO_3 . Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation. Cela pourrait provenir du fait que des particules de CaCO_3 seraient incorporées dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de CaCO_3 incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25% [2].

1.4.5. Réactivité directe de la poudre de marbre

Longuet, et al.,[5] ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C3A comme évaluation de la réactivité hydraulique de la poudre de marbre donné. En effet, il a été démontré que le CaCO_3 peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons (X) a permis de détecter la présence de carbo-aluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange. La formation de carbo-aluminates de calcium hydraté est vue comme analogue à celle de l'ettringite. Il y a composition entre SO_4 et CO_3 pour réagir avec les aluminates de calcium. La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec un hydraté de formule C3A. $\text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. La forme $\text{C3A} \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec CaCO_3 [2].

1.4.6. Effet des fillers de marbre sur les aspects rhéologiques

La présence des fillers de marbre (fillers de calcaires : le marbre est composé de 100% de calcaire (CaCO_3)) implique des variations du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. L'effet s'oriente vers un effet fluidifiant.

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin ou pulvérisation de certaines roches naturelles, agissant sur certaines qualités de ciment avec leur taille appropriée. Les fillers de calcaire sont les plus utilisés en Algérie. Ces fillers ont souvent été considérés comme inertes. Mais selon d'autres auteurs, le calcaire est un facteur important dans l'hydratation du C3A, ainsi que C3S et $\beta\text{-C2S}$, en présence de CaSO_4 et de chaux.

Le calcaire remplit les pores entre les particules de ciment en raison de la formation de phases carbo-aluminate [6]. Il est conclu que, dans les pâtes contenant du CaCO_3 , soit comme un réactif chimique ou comme constituant de calcaire, la transformation de l'ettringite à mono-sulfate est retardée, tandis que l'aluminate de calcium mono-carbonate est formé de préférence au lieu de mono-sulfate même à un âge précoce. En outre, l'hydratation des silicates de calcium est accélérée [7-9]. Ceci explique la résistance élevée du ciment au jeune âge.

Menendez et al. [10] et Ramezani pour et al. [11] ont montré que des bétons de ciment Portland calcaire (PLC) ayant jusqu'à 10% de calcaire fournissent des propriétés compétitives avec des bétons de ciment Portland PC.

L'utilisation de la poudre de marbre (composé presque de 100% de CaCO_3) comme un remplacement de ciment a fait l'objet de plusieurs projets de recherche. Agarwal & Gulati [12] ont montré que la présence de poudre de marbre dans la matrice de ciment améliore la résistance à la compression au jeune âge. Topçu et al. [13] et Alyamac et Ince [14] ont montré que les quatre poudres de marbre différents produits en Turquie caractérisée par une finesse Blaine comprise entre 3900 à 5100 (cm^2/g) peut être utilisé avec succès et économiquement en tant que filler dans le béton auto-plaçant. Pour d'autres auteurs, l'incorporation de **8%** de poudre de marbre a entraîné une réduction des résistances de mortier. En revanche, Valeria et al. [15] ont montré que la substitution de **10%** de sable par de la poudre de marbre en présence d'un adjuvant super-plastifiant fourni une résistance à la compression maximale au même niveau de maniabilité comparable à celle du mélange de référence après 28jours de durcissement. En outre, un effet encore plus positif de la poudre de marbre est évident à un âge précoce, en raison de sa capacité de remplissage.

Mebarkia et Atia [16] ont montré que pour un taux de **5%** d'ajout de poudre de marbre (PM) avec une SSB de $6668\text{g}/\text{cm}^2$, la résistance à la compression est plus élevée comparée à celle d'un béton sans ajouts pour toutes les échéances (3,7, 28 et 60jours) ; cela est dû à l'effet filler de la poudre de marbre car avec une si grande surface spécifique le béton est plus compacte et donc plus résistant. Avec un taux de **10%** de poudre de marbre, la résistance est comparable à celle d'un béton témoin sans ajout. Le tableau 1.1 et la figue 1.1 résume ces résultats.

Tableau 1.1. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de poudre de marbre [16]

Type de béton		Béton témoin	Béton avec PM5%	Béton avec PM10%
Résistance du béton en (MPa)	3jours	26.70	32.05	25.92
	7jours	36.60	42.39	32.15
	28jours	54.05	60.83	50.28
	60jours	69.60	70.84	59.17

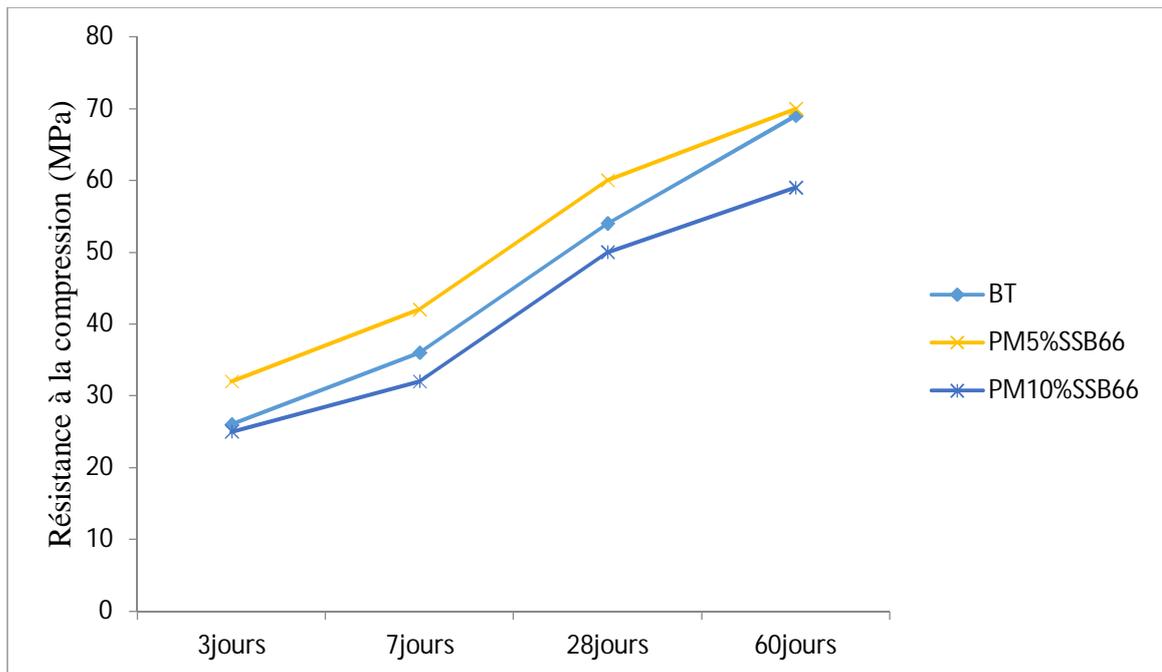


Figure 1.1. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de poudre de marbre [16]

1.5. Déchet de brique

1.5.1. Définition de la brique

La brique est un élément de construction généralement en forme de parallélépipède rectangle de dimension bien déterminée constituée de terre argileuse crue, séchée au soleil ou cuite au four, employée principalement dans la construction de murs, elle est à la fois un isolant et joue le rôle d'accumulateur thermique. La brique est un matériau fait d'argile ou d'autres matières argileuses [17].

1.5.2. Types de brique

Il existe différents types de briques pleines avec des aspects de surface variée [18] :

- la brique de terre crue, qui peut aussi contenir des fibres (pailles, lin, crin...),
- la brique de terre compressée,
- la brique cuite pleine, matériau traditionnel très ancien, avec une variante appelée brique pleine perforée (les perforations sont perpendiculaires au plan de pose),
- la brique légère et isolante (qui flotte sur l'eau) utilise une terre silico-magnésienne sans consistance mais qui mélangée à un vingtième environ d'argile plastique

produisait des briques aussi résistantes que des briques ordinaires, mais très poreuses, conduisant mal la chaleur ou le froid et flottant sur l'eau.

- la brique cuite creuse, plus légère (et donc moins coûteuse à transporter) et plus isolante, est devenue la plus utilisée, Ses perforations sont parallèles au plan de pose de manière à ne pas diminuer sa résistance à la pression,
- la brique de chanvre, ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique,
- la brique non gélive,
- la brique réfractaire, pour la construction des fours, chaudières, foyers, cheminées, etc.

Selon le type, elles peuvent connaître différents usages :

- briques de parement : destinées à rester apparentes et sont purement décoratives,
- briques pleines : destinées à la construction de murs extérieurs, porteurs,
- briques plâtrières : servent à construire les cloisons intérieures et les murs de refend).

1.5.3. Valorisation des déchets de brique

Il existe peu d'informations disponibles sur le devenir des déchets de briques qui constituent la plus grande partie des déchets de démolition et de décombres. D'une part, techniquement, les déchets de briques sont pratiquement recyclés comme composant d'un matériau type maçonnerie. D'autre part, l'absence quasi-totale des textes réglementaires qui régissent la fabrication et l'utilisation des déchets de briques [18].

La valorisation de la matière est un mode d'exploitation des déchets qui vise à leur mise en valeur afin de les réintroduire dans le circuit économique. Elle couvre le réemploi, la réutilisation, la régénération et le recyclage de la matière.

Lors de travaux de démolition, les briques récupérées peuvent être nettoyées et réutilisées sur le même chantier ou ailleurs. Par ailleurs, certaines briques anciennes ont une grande valeur architecturale et sont recherchées pour les rénovations historiques.

Le recyclage est un procédé qui consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première naturelle. Il se distingue de la réutilisation par la nécessité de nouveau traitement que la matière subisse.

Les briques, peuvent être concassées et utilisées comme granulats dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de la construction [18].

1.5.4. Propriétés des bétons des déchets de brique

Les briques sont utilisées pour la fabrication du béton et la performance de tel béton a été assez satisfaisante. L'usage de briques comme déchet est d'intérêt particulier.

Bien que largement usagé, il n'y avait pas d'études systématiques des différentes propriétés du béton du déchet de brique.

Parmi les différentes propriétés, on peut citer :

- L'absorption du déchet de brique est estimée entre 5% et 15% par rapport au poids de la matière dans son état sec. C'était nécessaire, par conséquent, il faut saturer les déchets de brique avant tout mélange.
- La masse volumique apparente du béton de brique varie de 2000 à 2080 kg/cm³
- L'ouvrabilité peut être appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams.
- Il est nécessaire de procéder au maintien prolongé à l'état humide de tous les bétons de briques, pour empêcher le dessèchement des liants et la ségrégation de surface du béton.
- L'utilisation du déchet de brique peut produire un béton de structure de haute résistance avec une économie de poids allant jusqu'à 15%.
- Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée.
- Le béton contenant des déchets de brique est plus perméable que le béton normal.

L'utilisation de déchet de brique dans le ciment :

Les déchets de brique peuvent être utilisés dans le ciment comme des ajouts minéraux actifs (pouzzolane artificielle) avec un taux de (10%).

Si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton [18].

1.5.5. Avantages et inconvénients d'utilisation des briques

Les avantages du point de vue environnement sont :

- La terre absorbe et restitue l'humidité.
- La terre régule la température par inertie thermique.
- La terre est un très bon isolant phonique.

Les Avantages écologiques sont :

- La terre utilise peu d'eau en phase de transformation.
- La terre est une ressource locale abondante et renouvelable.
- La construction en terre crue n'utilise que 3% de l'énergie employée dans une construction en béton [18].
- La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler.
- Il faut aussi bien avoir conscience que le financement de ce type de maison n'est pas conventionnel, en effet il vous sera difficile d'obtenir un prêt hypothécaire pour ce genre d'habitation [18].

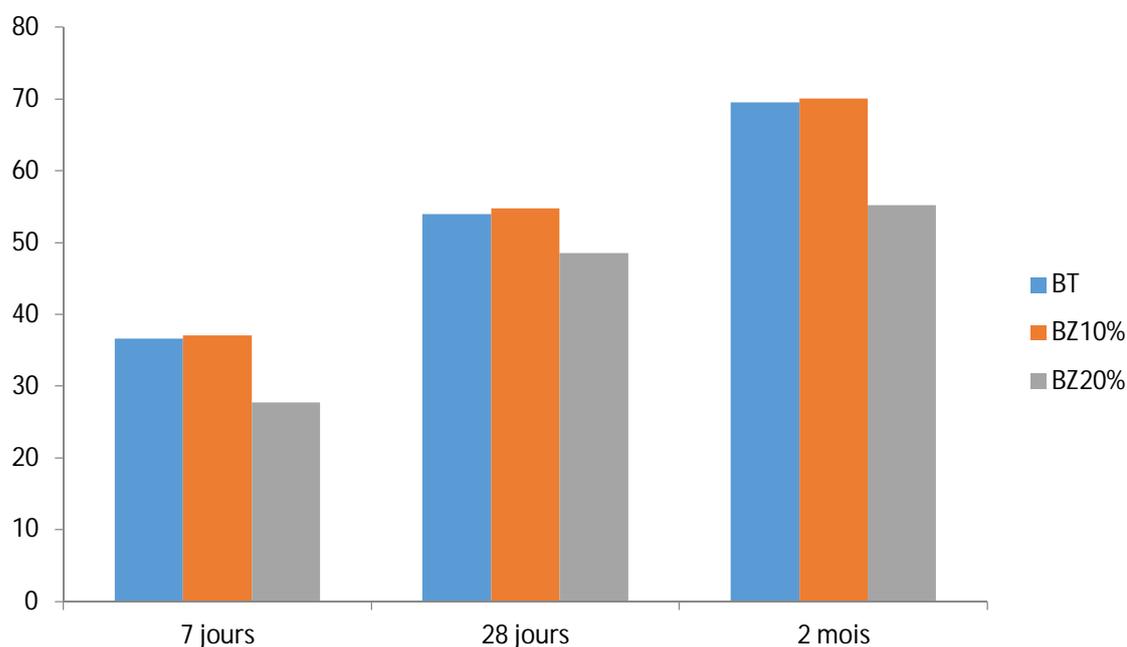
1.5.6. Propriétés des bétons des déchets de brique

Nacéri et Chikouche Hamina [19] ont montré que le déchet de brique peut être utilisé jusqu'à **10%** en remplacement du ciment dans la production de mortier de ciment. En effet, après 3 mois, les mortiers contenant jusqu'à **10%** de déchet de brique atteindront une résistance comparable à celle d'un mortier témoin sans ajout. Aussi, Bourema [18] a montré que l'utilisation de déchet de brique avec une substitution de **10%** du poids du ciment est très avantageuse dans les BHP soit à l'état frais ou à l'état durci.

Boucenna et Madji [20] ont montré que pour un taux de **10%** d'ajout de poudre de déchet de brique (DB), la résistance à la compression est identique à celle d'un béton sans ajout, mais pour un taux de 20%, la résistance est réduite pour toutes les échéances (7, 28 et 60jours) ; cela est dû à la moyenne réactivité pouzzolanique (pouzzolane artificielle) du déchet de brique, ces résistances peuvent s'améliorer à partir de 90jours. Le tableau 1.2 et la figure 1.2 résumant ces résultats.

Tableau 1.2. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de déchet de brique [20]

Type de Béton	Temps (jours)	Béton témoin	Béton avec DB10%	Béton avec DB20%
Résistance à la compression (MPa)	7	36.57	37.03	27.68
	28	53.92	54.75	48.5
	60	69.56	70.1	55.2

**Figure1.2.** La résistance à la compression du béton en fonction du taux de déchet de brique [20]

1.6. Le laitier de haut fourneau

1.6.1. Définition

Le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO₂) et alumine (Al₂O₃).

L'élaboration du laitier peut conduire selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques : laitier vitrifié (granulé) obtenu par refroidissement rapide par trempe et le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent à l'air du laitier liquide (Figures 1.3 et 1.4).

Ces deux formes minéralogiques sont fondamentalement différentes du point de vue cristallographique et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulité latente. Au contraire, le laitier cristallisé possède une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste [21].



Figure 1.3. Laitiers cristallisés et vitrifiés (source internet).

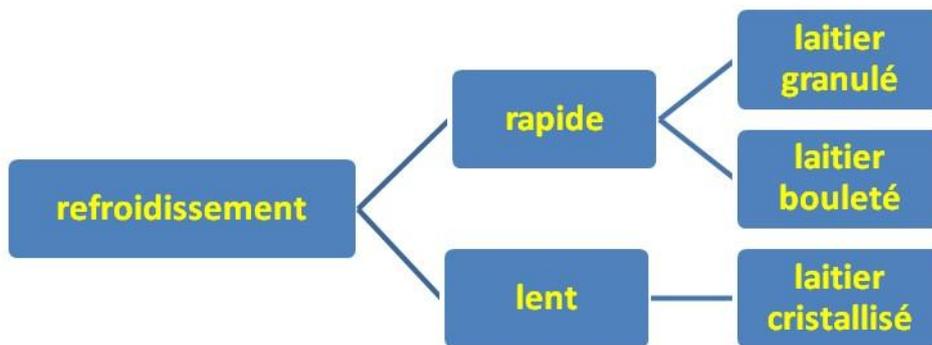


Figure 1.4. Les principales formes minéralogiques du laitier (source internet).

1.6.2. Les principales formes de laitier

La granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation du laitier pour faciliter sa manutention. Elle se faisait très simplement en déversant le jet de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau. On s'avisa ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du

laitier granulé ainsi obtenu. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en minimum de temps (il faut atteindre des températures inférieures à 800°C en un minimum de temps), pour obtenir l'état vitreux indispensable pour son utilisation comme substitut du ciment portland.

Ensuite, les différents types de granulations furent inventés et expérimentés pour :

- Améliorer la constante des caractéristiques du laitier granulé.
- Augmenter sa réactivité.
- Diminuer la consommation d'eau qui est importante (8 à 10 m³/t de laitier) [21].

La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air.

Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses. C'est pendant cette trajectoire aérienne que la trempe a lieu. Le matériau s'égoutte ensuite naturellement.

Le tableau 1.3 présente les propriétés du béton au laitier granulé.

Tableau 1.3. Propriétés du béton au laitier granulé [22]

Propriétés du béton frais	Commentaire
L'affaissement et l'ouvrabilité	Le LGHF améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton, et l'ampleur de cette amélioration va de pair avec la proportion de LGHF utilisé, cependant que le LGHF à finesse élevée n'améliore pas l'ouvrabilité du béton.
Le ressuage	L'utilisation de laitier n'as pas d'incidence significative sur le ressuage du béton.
L'augmentation autogène de la température	-L'utilisation du LGHF peut atténuer l'augmentation autogène de la température dans les éléments en bétons, ainsi que les risques de contraintes thermiques et de fissurations associée, si le pourcentage de laitier utilisé comme substitut partiel au ciment portland est suffisamment élevé (c.à.d. au

	<p>moins 50%, pourvu que la finesse de Blaine se soit pas supérieure à environ 6000cm²/g).</p> <p>-Par temps chaud, un pourcentage de remplacement plus élevé (>65%) pourrait s'avérer nécessaire.</p>
Temps de prise	<p>-Le temps de prise du béton du laitier peut être plus lent que celui du béton de ciment Portland, en particulier en temps froid.</p> <p>-La prise plus lente dépend de la réactivité du laitier et de son pourcentage dans le mélange.</p>
La mise en place	<p>-Étant donné que le développement de la résistance légèrement plus lent du béton content du LGHF, sa mise en place est délicate par temps froid, puisque de faibles températures peuvent réduire encore davantage son temps de prise.</p> <p>-Par temps chaud, les temps de prise sont semblables à ceux du ciment Portland.</p>
Propriétés du béton durci	Commentaire
Développement de la résistance	<p>-En général la résistance du béton contenant du LGHF se développe plus lentement, est plus faible initialement et égale ou supérieure à long terme à celle du béton Portland de résistance à la compression à 28 jours semblable.</p> <p>-Par temps chaud, le développement de la résistance peut être aussi rapide, sinon plus, que celui du béton de ciment portland.</p>
Retrait au séchage	<p>-Il n'y a pas de différences notables en ce qui concerne les caractéristiques de retrait entre le béton avec et sans LGHF comme ajout cimentaire, si la proportion de la pâte est la même.</p> <p>-Il est par ailleurs possible de tirer avantage de l'ouvrabilité améliorée et de la réduction possible d'eau nécessaire dans le cas du béton contenant du LGHF.</p>
Fluage	<p>-Le LGHF semble réduire le fluage en raison de l'augmentation de la résistance finale et du module d'élasticité du béton qu'il entraîne.</p>

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé.

Après solidification de la surface, le refroidissement est activé par un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier [21].

La figure 1.5 présente des échantillons de laitier granulé et bloc de laitier cristallisé.



Figure 1.5. Echantillons de laitier granulé et bloc de laitier cristallisé (source internet).

1.6.3. L'effet chimique et effet physique du laitier granulé

L'activité pouzzolanique est un phénomène aboutissant à la formation de phases susceptibles de manifester de la résistance mécanique après le durcissement. Elle se produit par l'effet de la réaction de la chaux sur les produits formés par l'attaque alcaline des silicates acides.

La réaction produit des hydrates semblables aux phases néoformées par l'interaction du clinker avec du laitier de haut fourneau : silicates de calcium et aluminates de calcium hydratés en présence d'un excès de chaux. Les réactions pouzzolanique mettent en jeu la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le processus d'hydratation [22].

Le rôle chimique de laitier consiste à améliorer la microstructure de la pâte en fixant la portlandite Ca(OH)_2 libérée par l'hydratation de ciment. Cette dernière se présente sous forme de plaquette de faible résistance. Cette réaction pouzzolanique donne naissance à un deuxième silicate de calcium hydraté supplémentaire (C-S-H) principale responsable du durcissement de la pâte de ciment $[\text{Ca (OH)}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}]$.

Le rôle physique de laitier finement broyée consiste à remplir les vides entre les grains de ciment, ce remplissage fait augmenter la compacité du béton et par conséquent sa résistance [22].

1.6.4. L'hydratation du laitier granulé de hauts fourneaux

L'initiation de la prise du laitier est liée à deux phénomènes successifs ne se produisant qu'en présence d'un activant (agent basique).

Ces deux phénomènes sont :

1/ Le passage en solution dans l'eau interstitielle de l'aluminium, du silicium et du calcium sous l'action des ions hydroxyle OH de la solution, la solubilisation étant accélérée à partir de $\text{pH}12$.

2/ La cristallisation à partir de la phase aqueuse de composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que le laitier. L'apport de calcium est donc nécessaire pour l'hydratation pour prévenir la chute du pH en dessous du seuil d'attaque.

L'activant répond à une double fonction : il permet de maintenir le pH au-dessus de 12,6 par apport de chaux en excès et il participe à la formation des hydrates.

L'activation peut se produire selon différents mécanismes en fonction de la nature chimique de l'agent. Il existe : l'activation alcaline (sodique ou calcique), l'activation sulfatique et l'activation sulfo-calcique. Les produits formés sont alors de compositions et de dispositions différentes. L'activation des laitiers dans le ciment est de type calcique (à cause de la portlandite libérée par l'hydratation du ciment active) et un peu sulfo-calcique [22].

1.6.5. Utilisation des laitiers de haut fourneau en cimenterie

Seul le laitier granulé est utilisé en cimenterie, il possède des caractéristiques intéressantes en tant que constituant principal du ciment et en tant qu'addition minérale.

Dans plusieurs pays, le laitier granulé de haut fourneau est utilisé généralement en combinaison avec le ciment Portland dans le mortier et le béton. En Algérie, son taux de remplacement est limité entre 15% à 20%.

L'addition du laitier de haut fourneau au ciment présente un intérêt économique dans l'industrie du ciment et un intérêt technique dans le domaine de la construction [23, 24]. Le coût énergétique de ce sous-produit est pratiquement nul, néanmoins il requiert un peu plus d'énergie de broyage que le clinker [25].

Le laitier granulé de haut fourneau utilisé en cimenterie doit avoir la composition chimique suivante (Tableau 1.4):

Tableau1.4. Composition chimique du laitier granulé [1]

Eléments principaux	CaO	SiO₂	Al₂O₃	FeO	MgO	MnO	S*	SO₃**
Teneur en (%)	40-48	29-36	13-19	< à 4	< à 6	< à 2	< à 2	< à 0,5

- Soufre des sulfures, exprimé en S.
- Soufre des sulfates, exprimé en SO₃.

Si la proportion de laitier granulé de haut fourneau dans le ciment excède 5% en masse (constituant principal), seuls les laitiers satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisés.

- Le laitier granulé de haut fourneau doit contenir au moins deux tiers, en masse, de laitier vitreux ;
- Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme CaO+MgO+SiO₂. Le restant contient Al₂O₃ avec, en outre, de faibles quantités d'autres oxydes ;

- Le rapport en masse $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ doit dépasser 1,0.

Indiquons toutefois qu'il est possible d'utiliser, comme agrégats des laitiers granulés contenant plus de 15% de MgO, à condition de satisfaire la règle suivante de Parker et Nurse [26]:

Si le laitier granulé contient moins de 15% de magnésie (MgO), il est à la fois bon comme sable et utilisable en cimenterie à condition de satisfaire la règle pondérale suivante :

$$\% \text{CaO} > [(1,20 (\% \text{SiO}_2) + 0,9 (\% \text{Al}_2\text{O}_3)) + 1,75 (\% \text{S})] - [0,80 (\% \text{MgO})];$$

Si le laitier contient plus de magnésie (MgO) il peut encore servir à condition de satisfaire la règle pondérale suivante :

$$\% \text{CaO} > [0,93 (\% \text{SiO}_2) + 0,95 (\% \text{Al}_2\text{O}_3)] + 1,75 (\% \text{S}).$$

1.6.6. Effet de l'ajout du laitier de haut fourneau sur le béton

Bouaissi [27] a montré que la substitution du ciment par **10% ou 20%** de laitier de haut fourneau (LHF) n'a pas eu de conséquence sur la résistance à la compression du béton durant toutes les échéances (7, 28 et 60 jours). En effet, la résistance est pratiquement comparable avec celle du béton témoin. Cela peut être expliquée par la grande surface spécifique du laitier qui est nettement supérieure à celle du ciment portland, $4000\text{cm}^2/\text{g}$ et $3000\text{cm}^2/\text{g}$, respectivement. Le laitier est caractérisé par une hydratation latente et la résistance du béton peut s'améliorer remarquablement à une longue échéance (1 année ou plus). Le tableau 1.5 résume ces résultats.

Tableau 1.5. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de laitier [27]

Type de béton	Béton Témoin	Béton avec LHF10%	Béton avec LHF20%
7 jours	36.57	38.16	33.38
28 jours	54.05	50.72	53.89
60 jours	69.56	66.19	61.84

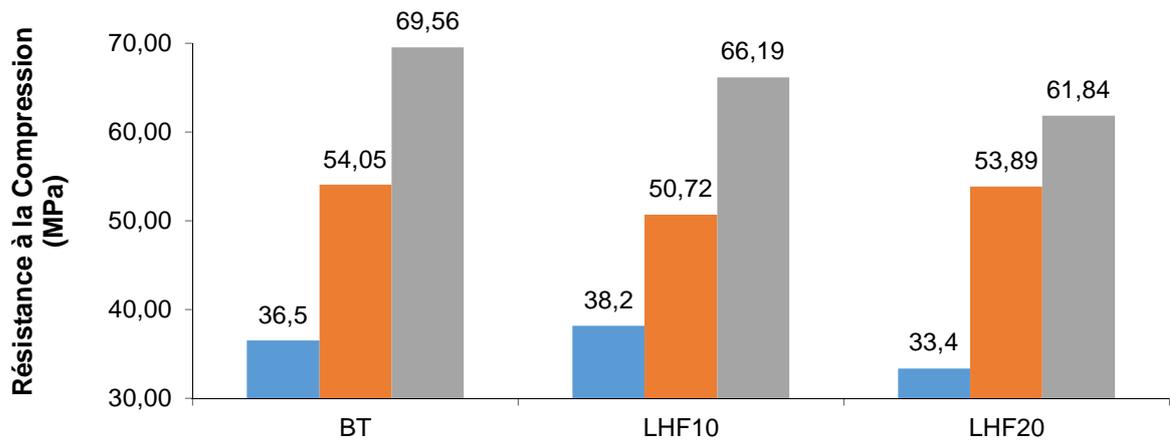


Figure 1.6. La résistance à la compression du béton en fonction du taux de laitier [27].

1.7. Conclusion

Cette étude bibliographique basée sur des études précédentes, nous a permis de mieux comprendre les effets bénéfiques de l'association du laitier, déchet de brique et poudre de marbre dans la fabrication du ciment. Les résistances bénéficient des effets à court terme dus à la présence de la poudre de marbre, de la réactivité de la brique à moyen terme et de l'hydraulicité à long terme du laitier. Toutefois, les taux de 5% de poudre de marbre, 10% de déchet de brique et 10% de laitier donnent de meilleures performances.

CHAPITRE 2
ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre 2. Etude Expérimentale

2.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, en premier lieu, les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail (ciment, poudre de marbre, déchet de brique, laitier de haut fourneau et sable normalisé). Ensuite, nous exposons les différentes méthodes, outils et procédures de mises en œuvre lors de la réalisation des essais expérimentaux dans laboratoire. Nous avons consacré une partie à la préparation de plan d'expériences appliqué et à la description des essais de caractérisation des mortiers.

2.2. Matériaux

Les matériaux utilisés dans ce travail expérimental sont : sable normalisé, ciment, poudre de marbre, déchet de brique et laitier de haut fourneau. La poudre de marbre, le déchet de brique et le laitier ont été tamisé à moins de $80\mu\text{m}$.

2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est issu de Biskra de type CEM I/CPA 42,5 R (Figure 2.1) a une résistance rapide à court terme, conforme à la norme Algérienne (NA 442-2013). Ses caractéristiques sont données dans le tableau 2.1.

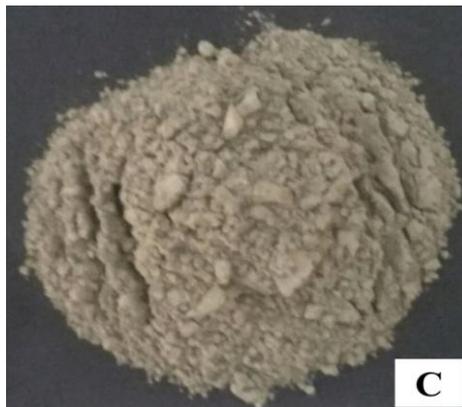


Figure 2.1. Echantillon de ciment CEM I (CPA 42.5 R).

Tableau 2.1. Propriétés du ciment utilisé CEM I (CPA 42.5 R)

Masse volumique Absolue (ρ_s) (Kg/m³)	3140
Masse volumique Apparente (ρ_a) (Kg/m³)	1160
Consistance normale (%)	26.1
Début de prise (min)	170
Fin de prise (min)	240
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	20-29
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	42.5-52.5

2.2.2. La poudre de marbre (PM)

La poudre de marbre utilisée est un déchet des marbreries collectée directement des ateliers de découpe des plaques de marbre (Figure 2.2). Ses caractéristiques physiques et sa composition chimiques ont été déterminées au laboratoire de contrôle de la cimenterie **SCAEK (Ain-El-Kebira)** et sont données dans les tableaux 2.2 et 2.3, respectivement.

**Figure 2.2.** Echantillon de poudre de marbre.**Tableau 2.2.** Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Densité	Perte au feu %	PH	inflammabilité	Couleur
2.7	41.81	9	Non	2.7

Tableau 2.3. Composition chimique de la poudre de marbre (X-ray fluorescence (XRF))

Elément	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O
%	0.13	0.11	0.10	57.67	0.70	0	0.05

- La couleur blanche indique que le marbre utilisé est un calcaire pur, il est composé quasiment par la calcite CaCO₃ [1].

2.2.3. Le Déchet de brique (DB)

Le déchet de brique utilisé est issu du concassage de briques neuves. Elles sont ensuite broyées et tamisées, la taille des fins est inférieure à 80 μ m (Figure 2.3). Sa composition chimique est donnée dans le tableau 2.4.



Figure 2.3. Echantillon de déchet de brique.

Tableau 2.4. Composition chimique de la poudre de déchet de brique (X-ray fluorescence (XRF))

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	PAF
%	50.20	16.42	6.95	9.90	2.72	0.15	2.57	0.60	0.001	10.49

2.2.4. Laitier de haut fourneau (LHF)

Le laitier granulé utilisé est un sous-produit d'El-Hadjar Annaba. Il est livré sous forme de sable de fraction 0/5 mm. Broyé et tamisé, la taille des fins est inférieure à 80 μ m (Figure 2.4).



Figure 2.4. Echantillon de laitier de haut fourneau (LHF).

Ces principales caractéristiques physico-chimiques sont regroupées dans le tableau 2.5 et tableau 2.6.

Tableau 2.5. Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau

Masse volumique apparente (g/cm³)	0.95
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.86
Surface Spécifique Blain (cm²/g)	2822
Perte au feu (%)	4.63

Tableau 2.6. Composition chimique du laitier de haut fourneau (X-ray fluorescence (XRF))

Élément	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O
%	37.77	7.87	2.16	42.06	4.26	0.60	0.26

2.2.5. Le Sable normalisé

Le sable normalisé utilisé dans notre étude (Figure 2.5) est de qualité supérieure CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes les garanties de qualité et de régularité. Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1350 ± 5 g. La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme EN 196-1 et de la norme ISO 679-2009. Pour confectionner les échantillons de mortier suivant les normes.



Figure 2.5. Echantillon de sable normalisé.

2.3. Formulation Standard du Mortier

Nous aurons à traiter un plan de mélange à 3 facteurs (déchet de brique DB, poudre de marbre PM et laitier granulé de haut fourneau LHF) pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution du ciment qui va jusqu'à 30% (135 grammes de ciment) (Figure 2.6) ; ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est donc contraint par la relation suivante :

$$DB (\%) + PM (\%) + LHF (\%) = 100 \%$$

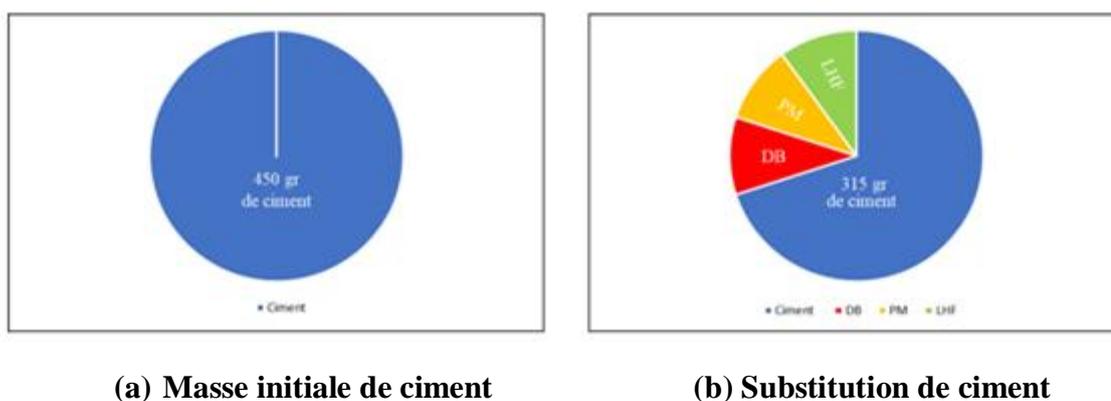


Figure 2.6. Substitution de ciment par des ajouts minéraux.

Tableau 2.7. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées

Mélange	Déchet de Brique (DB)	Poudre de marbre (PM)	Laitier de haut fourneau (LHF)
1	0	1	0
2	0.5	0	0.5
3	0.167	0.167	0.667
4	0.5	0.5	0
5	0.333	0.333	0.333
6	0.667	0.167	0.167
7	0	0.5	0.5
8	0	0	1
9	1	0	0
10	0.167	0.667	0.167

Tableau 2.8. Formulations du mortier standard selon un plan de mélange

Mélange	DB (g)	PM (g)	LHF (g)	Ciment (g)	Eau (ml)	E/C	Sable (g)
1	0	135	0	315	270	0.6	1350
2	67.5	0	67.5	315	270	0.6	1350
3	22.5	22.5	90	315	270	0.6	1350
4	67.5	67.5	0	315	270	0.6	1350
5	45	45	45	315	270	0.6	1350
6	90	22.5	22.5	315	270	0.6	1350
7	0	67.5	67.5	315	270	0.6	1350
8	0	0	135	315	270	0.6	1350
9	135	0	0	315	270	0.6	1350
10	22.5	90	22.5	315	270	0.6	1350

- Pour ne pas avoir un autre facteur influent et pour pouvoir étudier l'influence des ajouts, le rapport E/C est fixé à 0.6.

2.4. Confection des éprouvettes de mortier

Le malaxage du mortier est effectué par l'appareil spécifique dit le malaxeur (Figure 2.7). On fait le mélange des assemblages d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme (EN 196-1) :

- Mettre le malaxeur en position de marche,
- Verser la quantité d'eau dans la cuve ou le récipient de malaxeur, de façon lente,
- Ensuite, verser la quantité de ciment de même manière à vitesse lente pendant 30s.
- Mettre le malaxeur en attente, puis on ajoute la quantité de sable régulièrement
- Pendant les 30s suivantes.
- Mettre le malaxeur à vitesse lente et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes racler le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à vitesse rapide pendant 60 s.

Les opérations de malaxage sont résumées dans le Tableau 2.9.

Tableau 2.9. Opérations de malaxage des mortiers

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable et faire le malaxage	Raclage de la cuve	Reprendre le malaxage
Durée		30s	30s + 30s	15s	1mn 15s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse rapide



Figure 2.7. Le malaxeur à mortier.

- Les éprouvettes des mortiers $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$ (Figure 2.8) doivent être moulées instantanément juste après la préparation du mortier.
- Enduire les parois latérales des moules par une couche légère d'huile de décoffrage.
- Fixer le moule et la hausse sur la table à chocs (Figure 2.9) et introduire la première couche de mortier dans chaque compartiment.
- Etaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement.
- Serrer la première couche de mortier par 60 chocs (programmation de la machine).
- Introduire la seconde couche du mortier.
- Etaler la couche en utilisant la petite spatule tenue verticalement.

- Serrer la deuxième couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine).
- Retirer le moule et la hausse de la machine à chocs.
- Oter la hausse et enlever l'excédent de mortier avec la règle plate à araser.
- Etiqueter les moules pour identifier les éprouvettes (noms, date, caractéristiques)



Figure 2.8. Coulage du mortier dans les moules 4x4x16.



Figure 2.9. Table à choc spécifique à la fabrication des mortiers.

Dans notre étude, les moules des mortiers fabriquées sont placés dans un milieu ambiant à une température de 20 ± 2 °C, jusqu'au temps de décoffrage après 24 heure de la confection des mortiers. Les moules sont couverts et placés sur une table horizontale (Figure 2.10).



Figure 2.10. Echantillons des éprouvettes de mortiers après le coulage.

Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'au moment des essais mécaniques (7, 28 et 60 jours). Les éprouvettes doivent être retirées de l'eau, essuyées au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté.

2.5. Essais mécaniques

Les essais les plus fréquents réalisés pour déterminer le comportement mécanique des mortiers sont l'essai de traction par flexion et l'essai à la compression.

2.5.1. Résistance à la traction par flexion

Pour la résistance à la flexion, on a utilisé la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé.

L'essai de flexion 3 points est réalisé sur des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$. Le protocole suivi est celui de la norme EN 12390-5 (Figure 2.11).

Le bâti et l'échantillon sont installés au centre de la presse. Au cours de l'essai, la presse est programmée et pilotée en force à une vitesse de 10N/s. L'échantillon subit une force qui est répartie linéairement sur la face supérieure. La répartition des contraintes est linéaire dans

l'échantillon, la contrainte de traction étant maximale en face inférieure et pour une certaine valeur de contrainte, il y'a rupture de l'éprouvette (Figure 2.12).

La presse enregistre au cours de l'essai la force (F_f) en Newton (N) et le déplacement de sa traverse en (mm). La résistance à la traction par flexion (R_f) est déterminée par l'équation (1) :

$$R_f(N) = (1.5 \times F_f \times L) b^3 \quad (1)$$

Où :

R_f : est la résistance à la flexion en MPa.

F_f : est l'effort maximal de compression en (N).

L : est la distance entre les appuis du bâti de flexion en (mm).

b : est la largeur du prisme en (mm).

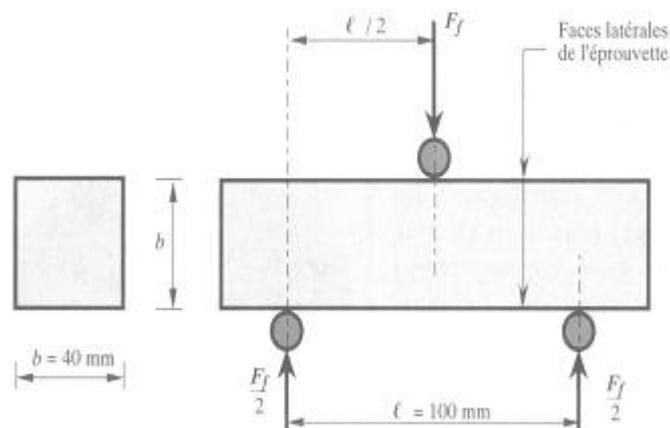


Figure 2.11. Principe de la flexion 3 points.



Figure 2.12. Essai et rupture en Flexion.

2.5.2. Résistance à la compression

L'essai est effectué sur les demi-prismes obtenus à l'essai de flexion, ils sont écrasés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40mm x 40mm. Les prismes sont testés en compression simple à l'aide d'un dispositif spécifique à la compression suivant la norme EN 196-1.

Le prisme est soumis à une force de compression jusqu'à la rupture. Pour cela, la presse est pilotée en déplacement à une vitesse de 500µm/s. Cette vitesse correspond à la vitesse imposée pour les mortiers normalisés. Le principe de l'essai de compression sur demi-prisme est donné par les figures 2.13 et 2.14.

Pour déterminer la résistance à la compression (R_c), obtenue sur chaque prisme, la valeur de force maximale (F_c) est relevée et elle est introduite dans la formule (2) :

$$R_c(\text{MPa}) = F_c(\text{max})/S \quad (2)$$

Où :

S : est la section initiale du prisme (40 x 40mm²).

F_c : est la force maximale de compression en (N).

R_c : est la résistance à la compression en (MPa).

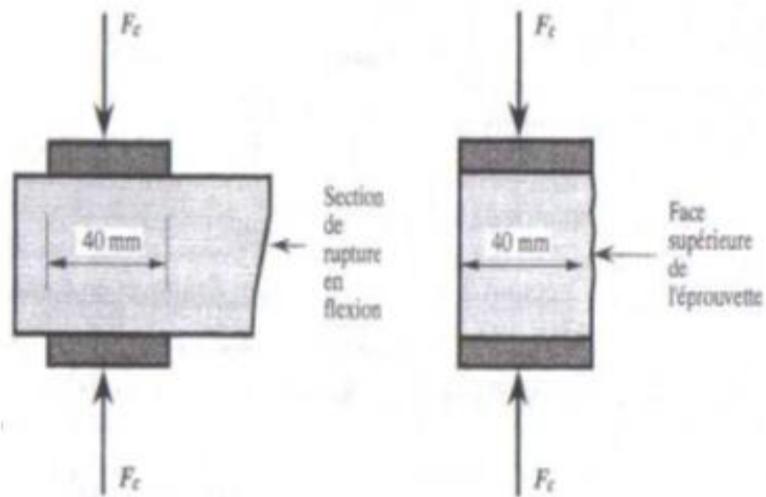


Figure 2.13. Le principe de l'essai à la compression du mortier.



Figure 2.14. Essai et rupture en compression.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des caractéristiques et les analyses physico-chimiques et minéralogique des matériaux utilisés pour cette étude qui sont : Ciment, poudre de marbre, déchet de brique et laitier. Il présente tous les essais effectués au niveau du laboratoire de l'université de Bordj Bou Arreridj.

CHAPITRE 3
RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre 3. Résultats et Discussions

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre des réponses sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de ciments contenant des ajouts fins ($D_{max} < 80\mu m$) avec des taux de substitution de 30%. Les Ajouts proviennent de déchets industriels (briques DB, poudre de marbre PM et laitier granulé de haut fourneau LHF). Pour mener bien notre recherche expérimentale, la méthodologie des plans d'expériences est utilisée. C'est un outil efficace pour modéliser les différentes propriétés des mortiers étudiés.

3.2. Rappel sur la formulation des mortiers

Des éprouvettes de mortier $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont étudiées dans ce travail expérimental. Un (1) mortier témoin (MT) a été confectionné conformément à la norme EN 196-1 (sable normalisé, $E/C = 0,5$ et $C/S = 1/3$) et dix (10) autres mortiers avec un rapport E/C fixé à 0.60 à cause de la présence des ajouts qui nécessitent un peu plus d'eau pour que leur maniabilité soit plus ou moins comparable à celle du mortier témoin. Nous avons traité un plan de mélange à 3 facteurs (DB, PM et LHF) pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution du ciment qui va jusqu'à 30% (135 grammes de ciment); ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est contraint par la relation $DB (\%) + PM (\%) + LHF (\%) = 100 \%$.

La figure 3.1 représente un réseau triangulaire des dix (10) combinaisons de mortiers étudiées :

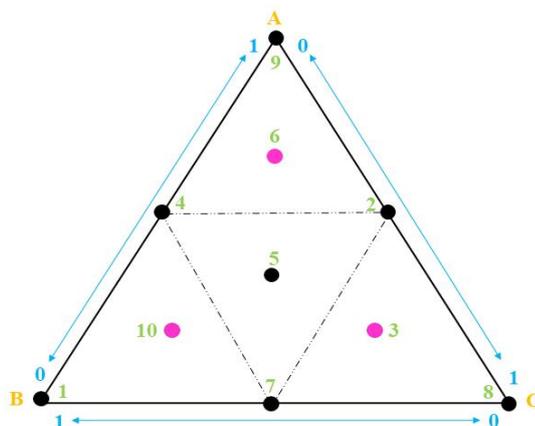


Figure 3.1. Courbe ternaire des dix (10) mortiers à trois (3) paramètres.

Le tableau 3.1 rappelle les compositions des onze mortiers étudiés.

Tableau 3.1. Compositions des différents mortiers

Mortiers	DB (g)	PM (g)	LHF (g)	Ciment (g)	Eau (ml)	E/C	Sable (g)
MT	0	0	0	450	225	0.5	1350
M1	0	135	0	315	270	0.6	1350
M2	67.5	0	67.5	315	270	0.6	1350
M3	22.5	22.5	90	315	270	0.6	1350
M4	67.5	67.5	0	315	270	0.6	1350
M5	45	45	45	315	270	0.6	1350
M6	90	22.5	22.5	315	270	0.6	1350
M7	0	67.5	67.5	315	270	0.6	1350
M8	0	0	135	315	270	0.6	1350
M9	135	0	0	315	270	0.6	1350
M10	22.5	90	22.5	315	270	0.6	1350

3.3 Evolution des masses volumiques

Les masses humides des différents mortiers à toutes les échéances (1j, 7j, 28j et 60jours) sont présentées dans le tableau 3.2. La masse à 1 jour est mesurée après le demoulage.

La variation de la masse volumique des différents types de mortiers en fonction du temps d'hydratation est illustrée sur la figure 3.2.

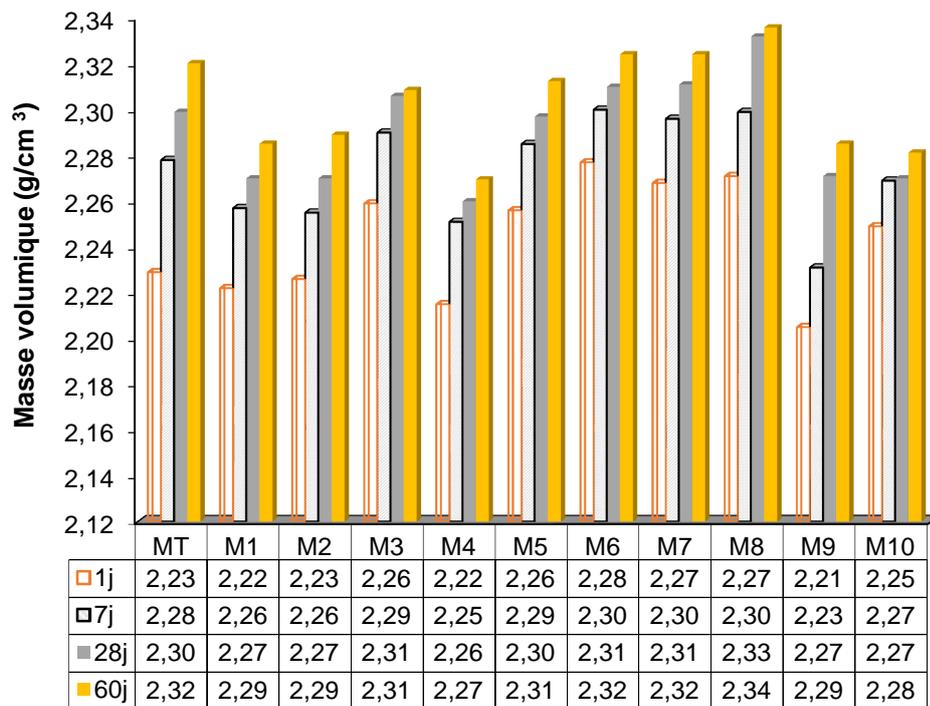
La masse volumique est calculée suivant la formule suivante (1):

$$M_v(g/cm^3) = Masse/(4x4x16) \quad (1)$$

On constate une faible augmentation des masses volumiques des mortiers (à toutes les échéances : 7j, 28j et 60jours). Les mortiers ont atteint rapidement une limite de saturation. Leur forte compacité est due à la mouture élevée des ciments ainsi que l'effet des fillers (déchet de briques, poudre de marbre et laitier granulé). Elle est de l'ordre de 2.3g/cm³.

Tableau 3.2. Masse des différents mortiers (g)

Mortiers	1jour	7jours	28jours	60jours
MT	571	583	589	594
M1	569	578	581	585
M2	570	577	581	586
M3	578	586	590	591
M4	567	576	580	581
M5	577	585	588	592
M6	583	589	591	595
M7	581	588	592	595
M8	581	589	597	598
M9	564	571	582	585
M10	576	581	582	584

**Figure 3.2.** Evolution de la masse volumique des différents mortiers.

3.4 Evolution des résistances mécaniques

Les figures 3.3 et 3.4 représentent l'évolution des résistances mécaniques (flexion et compression) des différents mélanges à toutes les échéances (7j, 28j et 60jours).

Pour les résistances à la flexion, on constate que presque tous les mélanges ont atteint des performances à toutes les échéances sauf les mélanges 9 et 10 qui enregistrent une résistance de plus de 8MPa après 60jours. Cela s'explique par la grande finesse de mouture des ajouts (<80 μ m). Le mortier témoin (MT) sans ajout enregistre la meilleure résistance avec 12.6MPa.

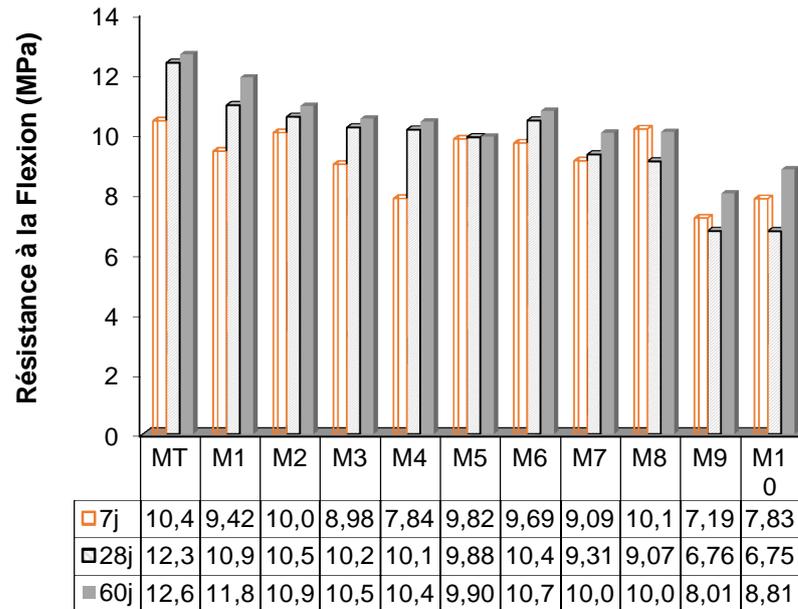


Figure 3.3. Evolution des résistances à la flexion.

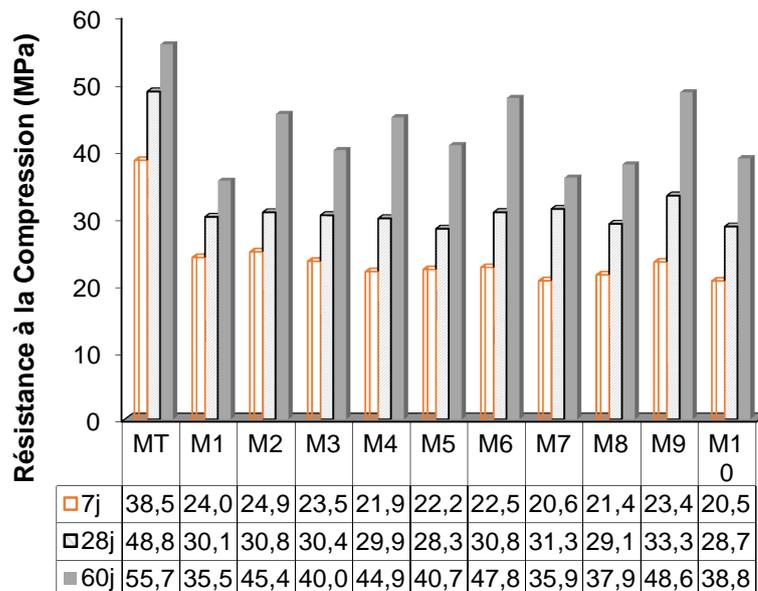


Figure 3.4. Evolution des résistances à la compression.

3.5. Analyse des résistances à la compression

L'analyse de variance (ANOVA) pour toutes les propriétés étudie l'effet des modèles et les paramètres (linéaires, binaires et ternaires) à partir des résultats mesurés.

3.5.1. Analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 7jours

Tableau 3.3. ANOVA pour la résistance à la compression à 7jours

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	15.21	6	2.53	2.17	0.2806	Not Significant
Linear Mixture	2.42	2	1.21	1.04	0.4549	
AB	2.69	1	2.69	2.30	0.2265	
AC	4.62	1	4.62	3.95	0.1409	
BC	3.09	1	3.09	2.64	0.2027	
ABC	0.029	1	0.029	0.025	0.8853	
Residual	3.51	3	1.17			
Cor Total	18.71	9				
Std. Dev.			1.08		R²	0.8125
Mean			22.54		Adj-R²	0.4376
C.V. %			4.80		Pred-R²	-5.8006
PRESS			127.27		Adeq Precision	5.004

La "valeur F du modèle" de 2,17 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 28,06 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi importante puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" supérieures à ($> 0,05$) indiquent que les termes du modèle sont insignifiants.

Dans ce cas, les composants de mélange linéaire: (DB, PM et LHF) sont des termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à ($> 0,05$) indiquent que les interactions de degré 2: (DB*PM), (PM*LHF), (DB*LHF) et degré 3: (DB*PM*LHF) sont des termes de modèle insignifiants.

Les valeurs de R^2 de 0.8125 n'est pas très loin de 1, ce qui implique également que les corrélations entre les modèles prédits et expérimentaux ne sont pas mauvaises (Figure 3.5).

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Le rapport de 5,004 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception.

L'équation (3) représente le modèle de régression de la réponse de la résistance en compression à 7 jours du mortier normalisé en termes des facteurs codés: **A(DB) ; B(PM) et C(LHF)**.

$$Rc7j = + 23.27A + 23.72B + 21.90C - 7.98AB + 10.46AC - 8.55BC \quad (2) \\ - 5.44ABC$$

La valeur de la résistance à la compression à 7 jours mesurée est représentée sous forme d'un graphique qui présente les valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites (figure 3.5). À partir de l'analyse des résultats, la majorité des réponses (Réel vs prédit) tracées est trop loin à la droite de régression de la distribution.

Le tracé de la courbe ternaire présenté dans la figure 3.6 illustre les effets des proportions de déchet de brique (DB), poudre de marbre (PM) et laitier de haut fourneau (LHF) sur la résistance à la compression à 7 jours.

Les résultats indiquent également que la résistance à la compression à 7 jours augmente avec l'augmentation des proportions PM et DB dans le système linéaire et dans le système binaire DB-LHF plus le système ternaire DB-PM-LHF, respectivement, correspondant à des proportions d'environ 0.5 de PM et 0.5 de LHF, puis diminue (Système binaire PM-LHF). Cela peut s'expliquer par l'hydratation latente du laitier de haut fourneau qui réagit à longue durée (1 an) par rapport à la poudre de marbre qui accélère l'hydratation au jeune âge (les 7 premiers jours) et le déchet de brique qui est caractérisée par une réactivité moyenne (90 jours)(pouzzolane artificielle).

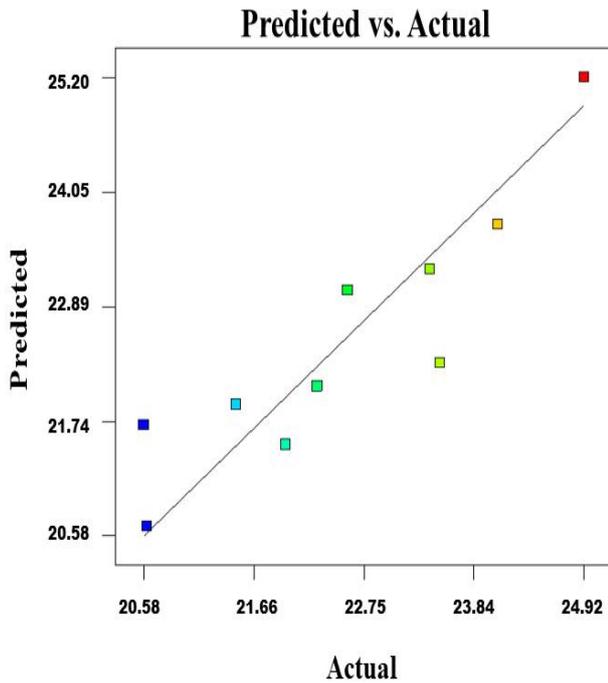


Figure. 3.5. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 7jours.

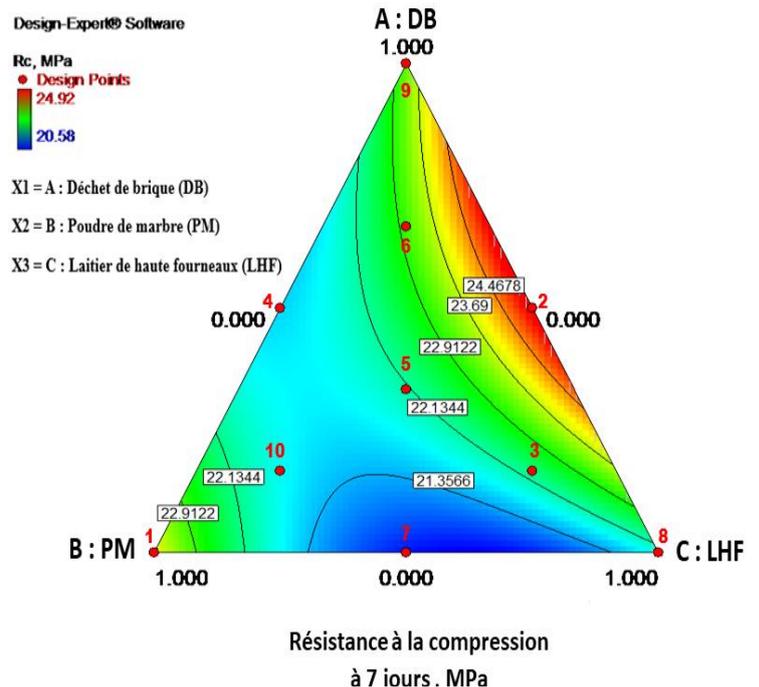


Figure. 3.6. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 7jours.

3.5.2. Analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 28jours

Tableau 3.4. ANOVA pour la résistance à la compression à 28 jours

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	12.59	6	2.10	138.27	0.0009	Significant
Linear Mixture	4.62	2	2.31	152.23	0.0010	
AB	2.16	1	2.16	142.18	0.0013	
AC	9.713E-004	1	9.713E-004	0.064	0.8166	
BC	1.95	1	1.95	128.76	0.0015	
ABC	1.86	1	1.86	122.72	0.0016	
Residual	0.046	3	0.015			
Cor Total	12.63	9				
Std. Dev.			0.12		R²	0.9964
Mean			30.66		Adj-R²	0.9892
C.V. %			0.40		Pred-R²	0.8698
PRESS			1.64		Adeq Precision	36.650

La valeur F du modèle de 138,27 implique que le modèle est significatif. Il n'y a que 0,09 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi importante puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à ($< 0,05$) indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, les composants de mélange linéaire (DB, PM et LHF), et binaire (DB*PM), (PM*LHF) et ternaire (DB*PM*LHF) sont des termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à ($> 0,05$) indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs (DB*LHF).

Les valeurs de R^2 de 0.9964 et adj- R^2 de 0.9892 sont très proches de 1, ce qui implique également qu'il existe d'excellentes corrélations entre les modèles prédits et expérimentaux (Figure 3.7).

"Adequate Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à (> 4) est souhaitable. le ratio de 36,650 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception.

L'équation (4) représente le modèle de régression de la réponse de la résistance en compression à 28 jours du mortier en termes des facteurs codés :

$$Rc_{28j} = + 33.21A + 30.06B + 29.96C - 7.15AB + 0.15AC + 6.80BC - 43.77ABC \quad (3)$$

La valeur de la résistance à la compression à 28 jours est représentée sous forme d'un graphique qui présente les valeurs observées en fonction des valeurs prévues (figure 3.7). À partir de l'analyse des résultats la majorité des réponses (Réel vs prédit) tracées est un très proche à la ligne de régression de la distribution.

La courbe ternaire de résistance à la compression à 28 jours est illustrée à la figure 3.8. On peut voir que l'augmentation de déchet de brique (DB) donne des résistances à la compression plus élevées que celles avec des teneurs élevées en poudre de marbre (PM) et laitier de haut fourneau (LHF). Cette augmentation est mise en évidence en rouge sur le côté des briques dans le graphe ternaire.

3.5.3. Analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 60 jours

Tableau 3.5. ANOVA pour la résistance à la compression à 60 jours

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	204.39	6	34.07	38.79	0.0062	Significant
Linear Mixture	194.37	2	97.19	110.66	0.0015	
AB	5.99	1	5.99	6.82	0.0796	
AC	3.65	1	3.65	4.15	0.1344	
BC	0.41	1	0.41	0.47	0.5432	
ABC	0.99	1	0.99	1.13	0.3657	
Residual	2.63	3	0.88			
Cor Total	207	9				
Std. Dev.			0.94		R²	0.9873
Mean			41.58		Adj-R²	0.9618
C.V. %			2.25		Pred-R²	0.6974
PRESS			62.65		Adeq Precision	17.249

La valeur F du modèle de 38,79 implique que le modèle est significatif. Il n'y a que 0,62 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi importante puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à ($< 0,05$) indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, les composants de mélange linéaire: (DB, PM et LHF) sont des termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à ($> 0,05$) indiquent que les interactions de degré 2: (DB*PM), (PM*LHF), (DB*LHF) et degré 3: (DB*PM*LHF) sont des termes du modèle insignifiants.

Les valeurs de R^2 de 0.9873 et adj-R^2 de 0.9618 sont très proches de 1, ce qui implique également qu'il existe d'excellentes corrélations entre les modèles prédits et expérimentaux (Figure 3.9).

"Adequate Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. le ratio de 17,249 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception.

L'équation (5) représente le modèle de régression de la réponse de la résistance en compression à 60 jours en termes des facteurs codés.

$$Rc60j = +48.96A + 35.44B + 37.91C + 11.91AB + 9.29AC - 3.12BC - 31.97ABC \quad (4)$$

La valeur de la résistance à la compression à 60 jours est représentée sous forme d'un graphique qui présente les valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédit (figure 3.9). A partir de l'analyse des résultats la majorité des réponses (Réel vs prédit) tracée est très proche à la droite de régression de la distribution.

La courbe ternaire de résistance à la compression à 60 jours est illustrée à la figure 3.10.

D'après l'analyse des résultats trouvés, on constate que la présence du déchet de brique améliore la résistance à la compression à 60 jours, notamment pour les teneurs à 100% (DB), 0% (PM) et 0% (LHF) (mélange 9).

En plus, le laitier de haut fourneau et le déchet de brique (mélange 2) ont une influence positive sur la résistance à la compression à 60 jours, notamment pour les teneurs à (50% (DB), 0% (PM) et 50% (LHF)) par rapport au mélange 4 (50% (DB), 50% (PM) et 0% (LHF)).

En outre, la présence d'une quantité adéquate des trois (3) ajouts, notamment (66.7% (DB), 16.7% (PM) et 16.7% (LHF)) (mélange 6) améliore la résistance à la compression à 60 jours du mortier par rapport aux mélanges 2 et 4.

Ces résultats sont expliqués par l'hydratation latente du laitier et la réactivité moyenne du déchet de brique. Quant à la poudre de marbre (un calcaire pur), elle a un effet accélérateur de prise au jeune âge.

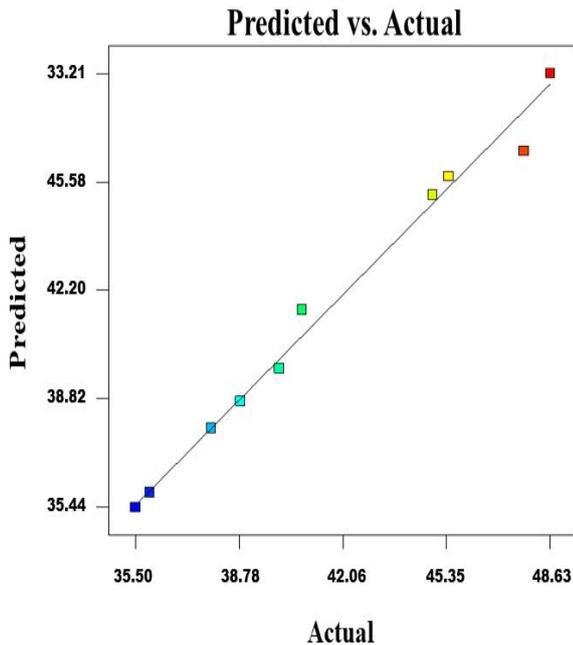


Figure 3.9. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 60 jours.

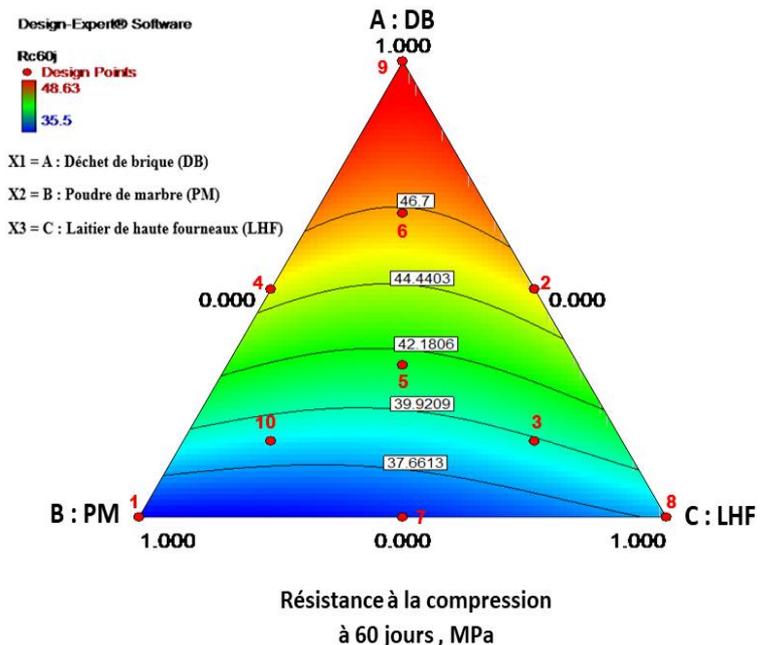


Figure 3.10. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 60 jours.

3.6. Conclusion

- Les résultats montrent que la résistance à la compression à 7 jours augmente avec l'augmentation des proportions PM et DB dans le système linéaire et dans le système binaire DB-LHF plus le système ternaire DB-PM-LHF, respectivement, correspondant à des proportions d'environ 0.5 de PM et 0.5 de LHF, puis elle diminue pour le système binaire PM-LHF.
- la présence de déchet de brique (DB) à une teneur maximale et la poudre de marbre (PM) et le laitier de haut fourneau (LHF) à une teneur nulle augmente la résistance à la compression à 28 jours, notamment pour une teneur de 100% de déchets de brique (DB), 0% de poudre de marbre (PM) et 0% de laitier de haut fourneau. D'autre part, le mortier normalisé témoin affiche la plus grande résistance à la compression à 28 jours (48.75MPa).
- L'introduction d'une quantité importante de poudre de marbre (PM), de laitier de haut fourneaux (LHF) et de déchet de brique (DB) dans le ciment (en substitution) conduit à une amélioration considérable de la résistance à la compression à 60 jours par rapport à celle enregistrée à 28 jours. Notamment, jusqu'à un optimum (66.7% (DB), 16.7% (PM) et 16.7% (LHF)).

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de ciments contenant des ajouts fins provenant de déchets industriels (briques DB, poudre de marbre PM et laitier granulé de haut fourneau LHF). Un plan de mélange à trois facteurs est utilisé afin de modéliser l'influence des trois ajouts sur les propriétés du mortier aux états frais et durci. La densité et les résistances mécaniques (Compression et flexion à 7, 28 et 60 jours) sont étudiées.

Les résultats obtenus montrent que la formulation des mortiers à base de ciment Portland avec fillers de déchets industriels, permet de fabriquer des mortiers économiques tout en conservant des propriétés mécaniques acceptables.

Après 60 jours de cure dans l'eau, l'ajout de déchet de brique seul (100% (DB), 0% (PM) et 0% (LHF) ou bien l'association du laitier de haut fourneau et de déchet de brique (50% (DB), 0% (PM) et 50% (LHF)) ou bien la combinaison des trois (3) ajouts (66.7% (DB), 16.7% (PM) et 16.7% (LHF)), le mortier a enregistré des performances à la résistance à la compression, 48.6MPa, 45.4MPa et 47.8MPa, respectivement. Le mortier témoin sans ajout a enregistré la plus grande résistance avec 55.7MPa.

Pour les résistances à la flexion, presque tous les mélanges ont atteint des performances à toutes les échéances. Le mortier témoin enregistre la meilleure résistance avec 12.6MPa.

Avec un temps de cure plus grand (90 jours pour le déchet de brique (pouzzolane artificielle) et plus de 6 mois voire 1an pour le laitier granulé), les résistances mécaniques augmenteraient encore plus. Les résistances bénéficieraient des effets à court terme dus à la présence de la poudre de marbre, de la réactivité de la brique à moyen terme et de l'hydraulicité à long terme du laitier [1].

Notons enfin que l'exploitation des résultats de l'expérience dans des tracés de contours binaires et ternaires pourrait offrir plus de flexibilité pour analyser et interpréter les résultats obtenus.

En perspectives, des études de durabilité s'imposent pour confirmer si les résultats obtenus seraient encourageants surtout pour les attaques chimiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] I. Messaoudene, "Formulation, Caractérisation et Durabilité des Matériaux Cimentaires aux Ajouts Minéraux Locaux." *Thèse de Doctorat, Université de M'sila- INSA-Rennes*, 2012.
- [2] S. Refrafi, "Influence des ajouts sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et des bétons." *Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra*, 2009.
- [3] L.D. Adams, and R.M. Race, "Effect of limestone additions upon drying shrinkage of Portland cement mortar," *ASTM International*, pp. 41-50, 1990.
- [4] VS. Ramachandran and C. Zhang, "Hydration kinetics and microstructural development in the $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system." *Matériaux et Constructions*, vol.19, n°114 :437-444, 1986.
- [5] P. Longuet, L. Beuglen and A. Zelwer, "La phase liquide du ciment hydrate." *Publication Technique CERILH n°2 19*, 1982.
- [6] M. Heikal, H. El-Didamony and MS. Morsy, "Limestone-filled pozzolanic cement." *Cement & Concrete Research*, 30(12): 1827-34, 2000.
- [7] G. Kakali, S. Tsvivilis, E. Aggeli and M. Bati, "Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO_3 ." *Cement & Concrete Research*, 30 (7):1073-7, 2000.
- [8] A.M. Poppe and G. De Schutter, "Cement hydration in the presence of high filler contents." *Cement & Concrete Research*, 35: 2290 – 2299, 2005.
- [9] M. Bouasker, P. Mounanga, P. Turcry, A. Loukili and A. Khelidj, "Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions." *Cement & Concrete Composites*, 30: 13–22, 2008.
- [10] G. Menendez, V. Bonavetti and EF. Irassar, "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag." *Cement & Concrete Research*, 25(1):61-67, 2003.
- [11] A. Ramezaniapour, E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani and F. Moodi, "Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes." *Cement & Concrete Composites*, 31: 715–720, 2009.
- [12] S-K. Agarwal, and D. Gulati, "Utilisation of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars." *Construction & Building Materials*, 20: 999-1004, 2006.
- [13] IB. Topçu, T. Bilir and T. Uygunoglu, "Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete." *Construction & Building Materials*, 23:1947-1953, 2009.
- [14] KE. Alyamac, and R. Ince, "A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders." *Construction & Building Materials*, 23:1201–10, 2009.
- [15] C. Valeria, M. Giacomo and R. Tarun, "Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete." *Construction & Building Materials*, 24: 113–117, 2010.
- [16] R. Mebarkia and M. Atia, "Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la rhéologie des bétons a l'état frais et a l'état durci. » *Mémoire Master, Université de Bordj Bou Arréridj*, Juillet 2018.
- [17] A.Barkat, "Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton." *Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah de Ouargla*, 2006.
- [18] M. Bourema, "Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci." *Mémoire de Master, Université de Skikda*, 2015.
- [19] A. Nacéri and M. Chikouche Hamina, " Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar." *Waste Management*, 29: 2378–2384, 2009.

- [20] I. Boucenna and A. Madji, "Effet de l'ajout de déchet de brique sur la rhéologie des bétons a l'état frais et a l'état durci." *Mémoire Master, Université de Bordj Bou Arréridj*, Juillet 2018
- [21] H. Zahouani and A. Touati, "Elaboration d'un béton auto-plaçant à base de laitier de haut fourneau." *Mémoire de Master, université d'Ouargla kasdi Merbah*, 2011.
- [22] A. Naceri and I. Messaoudene, "Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier." *Lebanese Science Journal "L.S.J" Vol. 7, N° 2 : 85-96*, 2006.
- [23] S.C. Pal, A. Mukherjee and S.R. Pathak, "Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete." *Cement and Concrete Research*, 33: 1481-1486, 2003.
- [24] B. Samet and M. Chaabouni, "Characterization of the Tunisian blast furnace slag and its application in the formulation of cement." *Cement and Concrete Research*, 34: 1153-1159, 2004.
- [25] J.T.G. Richardson and D.J. Haynes, " Slag bound materials in composites roads." *Society of Chemical Industry*, 5: 1-16, 2001.
- [26] V.S. Ramachandran, "Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton." *Institut de Recherche en Construction, Publications de l'IRC-CNRC, Canada*, 1995.
- [27] S. Bouaissi, "Effet de l'ajout de laitier de haut fourneau sur la rhéologie des bétons a l'état frais et a l'état durci." » *Mémoire Master, Université de Bordj Bou Arréridj*, Juillet 2018.