REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème :
Activation chimique de la poudre de brique cuite: Utilisation dans un mortier normalisé

Présenté par

- ***M*^{elle} OULDROUIS Lamia**
- ***M*^{elle} HADJERSI Farah**

Proposé et Dirigé par

Dr. IRKI Ilyes

Co-Encadré par

Dr. SETTARI Chafika

Promotion Juin 2019

Remercîment

Ce jour marque la fin d'une longue période d'étude à l'université de Médéa. Au terme de notre formation en générale et notre projet de fin d'étude en particulier, nous tenons à remercier, le Dieu miséricordieux qui nous a donné la force d'achever cette réalisation. Un grand merci à notre promoteur Mr : IRKI Ilyes. Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du génie civil de l'université de Médéa. Nos gratitudes à tous les membres du jury qui font l'honneur de juger notre travail. Un grand merci à toutes personnes ayant contribués à l'élaboration de ce mémoire.

HADJERSI Farah.

OULDROUIS Lamia.

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

A ceux que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination :

Mon très cher père ELFAYÇAL et ma très chère mère SALIMA.

Ma grande mère .

Ma sœur : RADJAA, et ma petite nièce adoré SIRINE.

Mes tantes, mes oncles.

Mes cousins et Mes cousines.

Toute la famille OULDROUIS et BOUKHELKHAL.

A tous Mes Amis, A toute La promotion Génie Civil de l'année 2019.

A ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage.

OULDROUIS Lamia.

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

A ceux que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination :

Mon très cher père Abdelaziz et ma très chère mère Khadîdja.

Mes sœurs : Amel, Amina, Zakia, Asma et ms frères : Mohamed et amine

A ma belle-famille surtout mon fiancé Houssem qui me soutenue dans mes moments pires

Mes beaux-frères : Kader Lotfi et Ismail

Mes nièces et Mes neveux.

Mes tantes, mes oncles.

Mes cousins et Mes cousines.

Ma grande mère.

Toute la famille HADJERSI.

A tous Mes Amis, A toute La promotion Génie Civil de l'année 2019.

A ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage.

HADJARSI Farah.

Résumé

Le recyclage des déchets a devenu aujourd'hui la bonne solution qui peut offrir de nouvelles ressources renouvelables et durables qui contribuent dans le processus de la construction dans le domaine de génie civil et ainsi pour protéger l'environnement. Les déchets de briques recyclés constituent une alternative intéressant dans ces cas vus que ces déchets sont disponibles et sont abandonnés au niveau de chantiers. Pour atteindre ces objectifs on essai à travers ce travail d'ordre expérimental de valoriser les poudres de brique cuites en les utilisant comme constituant dans le mortier normalisé.

L'incorporation de la poudre de brique s'effectue par la substitution du ciment par six teneurs 5% 10%, 15% 20% ,25% et 30%. La procédure expérimentale mise en place vise à déterminer les caractéristiques physicomécaniques du mortier normalisé confectionnés à partir de poudre de brique et de les comparées avec celles du mortier témoin sans poudre de brique afin d'exprimer la rentabilité de ce genre de déchets. La poudre de brique utilisé est traité par calcination à 600, 800, 1000 °C et sans calcination, suivi par un protocole de broyage mécanique pour avoir une finesse de Blaine de 5200 cm2 / g d'environ, en utilisant du NaOH avec diffèrent pourcentages (2,4 ,6, et 8%) comme un activant chimique. Les caractéristiques à étudiées sont : le temps d'écoulement à l'état frais et à l'état durci, la résistance à la compression et à la traction à l'âge de 7 et 28 jours, l'absorption capillaire et la porosité.

Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation de déchet de brique avec une substitution de 10% du poids du ciment est très avantageuse dans le mortier normalisé soit à l'état frais ou à l'état durci.

Mots clés : mortier normalisé ; déchet de brique ; calcination. Activant chimique.

Abstract

Waste recycling has now become the right solution that can offer new renewable and sustainable resources that contribute to the construction process in the field of civil engineering and thus to protect the environment. Recycled brick waste is an interesting alternative in these cases as these wastes are available and abandoned at worksites. To achieve these objectives, we try through this experimental work to valorize the cooked brick powders using them as a constituent in the standardized mortar.

The incorporation of the brick powder is carried out by the substitution of the cement by six contents 5% 10%, 15% 20%, 25% and 30%. The experimental procedure is designed to determine the physic mechanical characteristics of the standard mortar made from brick powder and compared with those of the control mortar without brick powder in order to express the profitability of this type of waste. The brick powder used is treated by calcination at 600, 800, 1000 ° C and without calcination, followed by a mechanical grinding protocol to have a Blaine fineness of 5200 cm 2 / g of approximately, using NaOH with different percentages. (2.4, 6, and 8%) as a chemical activator. The characteristics to be studied are: fresh and hardened flow time, compressive and tensile strength at 7 and 28 days of age, capillary absorption and porosity.

The results of this study show that the use of brick waste with a substitution of 10% of the weight of the cement is very advantageous in the standardized mortar either in the fresh state or in the cured state.

Key words: standardized mortar; brick waste; calcination. Chemical activator

الملخص

أصبحت إعادة تدوير النفايات الآن هي الحل الصحيح الذي يمكن أن يوفر موارد جديدة قابلة للتجديد ومستدامة تسهم في عملية البناء في مجال الهندسة المدنية وبالتالي لحماية البيئة

تعتبر نفايات الطوب المعاد تدويرها بديلاً مثيراً للاهتمام في هذه الحالات حيث تتوفر هذه النفايات وتُترك في مواقع العمل

لتحقيق هذه الأهداف، نحاول من خلال هذا العمل التجريبي تقييم مساحيق الطوب المطبوخة باستخدامها كعنصر أساسي في الهاون الموحد.

يتم إدخال مسحوق القرميد عن طريق استبدال الأسمنت بستة محتويات 5٪ 10 ٪، 15٪ 20٪، 25٪ و30٪. تم تصميم الإجراء التجريبي لتحديد الخصائص الفيزيائية للهاون القياسي المصنوع من مسحوق الطوب ومقارنته بخصائص هاون التحكم بدون مسحوق القرميد للتعبير عن ربحية هذا النوع من النفايات

يتم معالجة مسحوق القرميد المستخدم بالتكلس عند 600، 800، 1000 درجة مئوية وبدون تكلس، يتبعه بروتوكول طحن ميكانيكي للحصول على نعومة تبلغ 5200 سم 2 / جم تقريبًا، باستخدام هيدروكسيد الصوديوم بنسب مئوية مختلفة (2.4، 6، و 8 ٪) كمنشط كيميائي.

الخصائص التي يجب دراستها هي: زمن التدفق الطازج والمصلب، قوة الضغط والشد عند 7 و28 يومًا من العمر، الامتصاص الشعري والمسامية.

تظهر نتائج هذه الدراسة أن استخدام نفايات الطوب مع استبدال 10٪ من وزن الأسمنت مفيد جدًا في الملاط القياسي سواء في الحالة الطازجة أو في الحالة المعالجة.

الكلمات الأساسية: هاون قياسي. نفايات الطوب التكليس. المنشط الكيميائي

SOMMAIRE

Remercîment
Dédicace Lamia
Dédicace Farah
Résumé
Abstract
ملخص
Liste des tableaux
Listes des figures
Liste des abréviations
Introduction générale *1*
CHAPITRE I : Synthèse bibliographique *3*
I.1. Introduction 3
I.2. Mortier normalisé 3
I.2.1. Séquence de malaxage 3
I.3. Politique de recyclage en Algérie 4
I.4. Valorisation des Déchets de la Construction/Démolition 4
I.5. Valorisation des déchets et sous forme des additions 6
I.5.1. Laitiers de haut fourneau 6
I.5.2 . Pouzzolane naturelle : 11
I.5.3. Les cendres volantes 17
I.5.4 . Terre cuite 17
I.5.5 . Poudre de marbre 17
I.5.6 . Poudre de verre 18
I.5.7 . Poudre d'argile calciné 18
I.5.8 . Déchets de brique 19
I.6. Effet d'activateurs chimiques 33
I.6.1. Types d'activateurs alcalins 33
I.7. Matériaux précurseurs solides 41
I.7.1. Le métakaolin 41
I.7.2. Influence de la teneur en silice 41
I.7.3. Influence de la température de maturation 42
I.7.4. Influence de la concentration d'hydroxyde de sodium 43

I.7.5. Influence du rapport molaire silicium/aluminium (Si/Al) 43
I.7.6. Effet des activateurs alcalins sur les additions 43
CHAPITRE II : Matériaux et essais 51
II.1. Introduction 51
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés 51
II.2.1. Ciment 51
II.2.2. Sable 53
II.2.3. Eau de gâchage 54
II.2.4. Déchets de brique cuite 54
II.3. Formulations des mortiers 57
II.3.1. Mortier témoin 57
II.3.2. Mortiers à base de déchets recyclés 57
II.3.3. Séquence de malaxage du mortier 58
II.3.3.2. Mortier à base de PBR avec activateur (NaOH) 59
II.4. Préparation et Conservation des Eprouvettes 60
II.5. Les essais sur mortier 61
II.5.1. Etat frais 61
II.5.2. Etat durci 63
CONCLUSION 68
CHAPITRE III : Analyse et discutions des résultats 51
III.1. Introduction 70
III.2. Essais sur mortier à base de déchets 70
III.2.1 État frais 70
III.2.2. État durci 72
Conclusions générales et recommandation 70
Conclusion générale 83
Recommandations 85
Références bibliographiques 83
ANNEXES 83

Liste des Tableaux

Tableau I. 1. Opérations de malaxage du mortier normal..... 3
Tableau II. 1: Différents compositions utilisées dans la recherche 51
Tableau II. 2: L'analyse chimique du ciment et composition du clinker..... 52
Tableau II. 3: Propriétés physiques d'identification des sables utilisés..... 53
Tableau II. 4: les composantes des mortiers formulés à base des déchets de brique..... 58
Tableau II. 5: mode de malaxage du mortier à base de PBR sans activateur alcalin..... 59
Tableau II. 6: mode de malaxage du mortier a base de PBR avec activateur..... 59
Tableau III. 1.Résultats d'essais à l'état frais de différentes familles de mortier…….....70

Liste des Figures

Figure I. 1..Effet de type de granulats recyclés sur la résistance à la compression d'un béton 5
Figure I. 2.Temps d'écoulement T20 en fonction de la teneur en laitier 6
Figure I. 3.Temps d'écoulement T40 en fonction de la teneur en laitier 7
Figure I. 4..Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps 8
Figure I. 5.Variation de la Résistance à la Traction en fonction du Temps 10
Figure I. 6.Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression 11
Figure I. 7.Rapport du dosage de superplastifiant avec la variation de substitution de la pouzzolane naturelle, et cela en deux différent rapport E/C 12
Figure I. 8.Comparaison entre la Résistance a la compression de PZN 12
Figure I. 9.Augmentation de la Résistance a la compression de PZN a E/C=0,35 à travers le temps 13
Figure I. 10.Augmentation de la Résistance a la compression de PZN a E/C=0,40 à travers le temps 13
Figure I. 11.Comparaison entre la Resistance a la traction de PZN 14
Figure I. 12.Augmentation de la Résistance a la traction de PZN a E/C=0,35 a travers le temps 14
Figure I. 13.Augmentation de la Résistance a la traction de PZN a E/C=0,40 à travers le temps 15
Figure I. 14.Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.35 15
Figure I. 15.Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.40 16
Figure I. 16. Différance de pourcentage d'absorption entre différent teneur en pouzzolane naturelle et rapport E/C 16
Figure I. 17.*Le Temps d'écoulement en fonction de MPfX]* 20
Figure I.18.La résistance à la compression en fonction de substitution en poudre de briqueF1=3900cm2/g 21
Figure I. 19.La résistance à la compression en fonction de substitution en poudre de brique F2=4300 cm2 21
Figure I. 20.La résistance à la compression en fonction de substitution en poudre de F3=5200cm2 /g 22
Figure I. 21.La résistance à la traction en fonction de substitution en poudre de brique F3=5200cm2 /g 22
Figure I. 22.L'absorption d'eau en fonction du temps du MP1 23
Figure I. 23.L'absorption d'eau en fonction du temps du MP2 23
Figure I. 24.L'absorption d'eau en fonction du temps du MP3 24
Figure I. 25.Evolution de la résistance en compression à 3 jrs 24
Figure I. 26. Evolution de la résistance en compression à 28 jrs 25
Figure I. 27.Evolution de la résistance en traction par flexion à 3 jrs 25
Figure I. 28.Evolution de la résistance en traction par flexion à 28 jrs 26
Figure I. 29.Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique (MBr) 27
Figure I. 30.Variation de la résistance à la compression des mortiers MBr 28
Figure I. 31.Variation de l résistance à la traction par flexion des mortiers MBr 29
Figure I. 32.Absorption capillaire du mortier à base de déchets de brique 29
Figure I. 33.La résistance à la compression en fonction de pourcentage de SBR 30
Figure I. 34.La résistance à la traction en fonction de pourcentage de SBR 31
Figure I. 35.L'absorption d'eau en fonction du temps du MS 31
Figure I. 36.La variation de la résistance du béton avec et sans granulats recyclés 32
Figure I. 37.Absorption d'eau du béton avec et sans granulats recyclés 33
Figure I. 38.Étapes du cycle de vie considérées pour la production de NaOH 34
Figure I. 39.Résistance à la compression des mortiers traités en fonction du pourcentage du NaOH 35

Figure I. 40.Porosité accessible à l'eau des différents mortiers en fonction de la température de calcination et % de NaOH 36
Figure I. 41.Corrélation entre la résistance et la porosité des déférents types des mortiers 37
Figure I. 42.Absorption d'eau par capillarité des mortiers 38
Figure I. 43.Relation entre l'absorption d'eau et de la porosité Calciné à 600°C 39
Figure I. 44. Relation entre l'absorption d'eau et de la porosité Calciné à 800°C**.** 39
Figure I. 45.Relation entre l'absorption d'eau et de la porosité Calciné à 800°C 39
Figure I. 46.Étapes du cycle de vie considérées pour la production de silicate de NaOH..... 40
Figure I. 47.Résistance mécanique à compression en fonction du processus de durcissement et de la composition de la matrice 42
Figure I. 48..L'Effet du dosage de NaOH sur le temps de prise d'un mélange contenant 50% ciment et 50%laitier 46
Figure I. 49.Résistance à la compression (24h) et le temps d'écoulement de mortiers contenant des activants soit dissous dans l'eau de gâchage, ou utilisés comme poudre mélangée avec le liant.[65]..... 48
Figure I. 50. Résistance relative à 24h par rapport à la résistance de référence (100% ciment) de mortiers contenant différentes concentrations en NaOH et en superplastifiants. Comparaison aux mortiers sans activants..... 49
Figure II. 1.le ciment utilisé (Annexe A) 52
Figure II. 2.Courbe granulométrique de sable utilisé 53
Figure II. 3. Protocole de concassage des déchets de brique cuite. 54
Figure II. 4.Calcination des Déchets de brique..... 55
Figure II. 5.Protocole d'obtention des finesses de PBR 55
Figure II. 6Analyse chimique des PBR par infrarouge (FTIR) 56
Figure II. 7.Schéma de principe de l'analyse par spectroscopie d'absorption infrarouge 56
Figure II. 8. Séquence de malaxage du mortier ordinaire..... 58
Figure II. 9.Préparation et Conservation des Eprouvettes 60
Figure II. 10.Hydroxyde de sodium (NaOH)..... 60
Figure II. 11.Consistance Vicat 61
Figure II. 12.Détermination du temps de prise 62
Figure II. 13.Principe de fonctionnement du maniabilimétre LCPC 62
Figure II. 14.Essai de traction par flexion sur mortier..... 63
Figure II. 15.Essai de compression sur mortier 64
Figure II. 16.Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier 64
Figure II. 17. Essai de porosité sur mortier..... 66

Figure III. 1.Temps d'écoulement en fonction du pourcentage de PBR..... 71
Figure III. 2.Temps d'écoulement en fonction du pourcentage du NaOH 72
Figure III. 3. La résistance à la compression en fonction de substitution de PBR à 07 jours 73
Figure III. 4. La résistance à la compression en fonction de substitution de PBR à 28 jours 73
Figure III. 5. La résistance à la compression en fonction de % du NaOH..... 74
Figure III. 6. La résistance à la traction en fonction de substitution de PBR à 7jrs..... 75
Figure III. 7. La résistance à la traction en fonction de substitution de PBR à 28 JRS..... 75
Figure III. 8. La résistance à la traction en fonction de % du NaOH 76
Figure III. 9: L'absorption d'eau par capillarité du PBR 600°C..... 77
Figure III. 10: L'absorption d'eau en fonction du temps du PBR 800°C..... 77
Figure III. 11: L'absorption d'eau en fonction du temps du PBR 1000°C..... 78
Figure III. 12: L'absorption d'eau en fonction du temps du PBR non calciné 78

Figure III. 13: L'absorption d'eau en fonction du temps et pourcentage du NaOH 79
Figure III. 14: Porosité accessible à l'eau en fonction de % du PBR 80
Figure III. 15. Porosité accessible à l'eau de mortier a base du PBR 80
Figure III. 16 . Corrélation entre l'absorption d'eau et la porosité..... 81
Figure III. 17. Corrélation entre la résistance et la porosité. 81
Figure III. 18 : relation entre la résistance et l'absorption d'eau 82

Listes des abréviations

BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton à haute performance
M	Mortier
MT	Mortier témoin
SBR	Sable de brique recyclé
PBR	Poudre de brique recyclé
M-T-X%	Mortier à base de poudre de brique cuite recyclé
M-NC	Mortier a base de PBR non calciné
T	Température de calcination
X%	Pourcentages du PBR
Y%	Pourcentages du NaOH
CPJ	Ciment Portland Composée
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
E/C	Rapport eau sur ciment
E/L	Rapport eau sur liant
CEMI 42.5	Ciment portland ordinaire de classe 42.5 MPa
G/S	Rapport gravillon/sable
R	Résistance
Rc	Résistance à la compression
Rt	Résistance à la traction
S/M	Le rapport Sable/Mortier
NaOH	Hydroxyde de sodium
CaO	Oxyde de calcium
SiO2	Oxyde de sodium ou silice
Na2CO3	Carbonate de sodium
Na2SO4	Sulfate de sodium
KOH	Hydroxyde de potassium
Na2O	Oxyde de sodium

Introduction générale

1. Contexte

L'importance et l'utilisation d'un mortier est très vaste ; il recouvre tous les aspects qui lui rend différent du béton traditionnel, c.-à-d. des changements relatifs tant aux constituants à la composition, et à la mise en œuvre qu'aux propriétés, il ait été surtout utilisé dans des applications mettant en valeur leur résistance élevée, il est inévitable que, dans un avenir très proche, le mortier sera de plus en plus utilisé pour sa durabilité plutôt que pour sa résistance.

De ce fait il peut être le réceptacle de différents sous-produits (déchets) qui peuvent être « engloutis » en son sein contribuant ainsi à l'action environnementale devenue un enjeu majeur mobilisant la communauté internationale dans son ensemble.

Les déchets qui autrefois ne suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude, ont commencé à constituer un problème économique et écologique. Les quantités énormes des déchets qui sont générées sans cesse immobilisent de plus en plus de grandes surfaces pour le stockage et réduisent ainsi les disponibilités des terrains sans compter la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences.

La protection de l'environnement est une préoccupation majeure qui se traduit, dans le domaine du génie civil, par la recherche de nouveaux procédés de construction ou de nouveaux produits à faibles impacts environnementaux. Si, par ailleurs, ces écoproduits amélioraient les propriétés d'usage des bétons actuels ou diminuaient la sinistralité, leur développement devrait requérir plus d'intérêt.

La production des granulats recyclés répond au besoin d'une source de granulats et à la réduction des volumes de déchets. Parmi ces derniers, la brique rouge qui peut être broyée et utilisés comme une addition cimentaire pour la fabrication du mortier. L'une des applications envisageables est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons, Le recyclage de brique dans le domaine des matériaux de construction apparait être une nouvelle alternative comme réutilisation de brique.

2. Objectif et intérêt scientifique du sujet

L'objectif de notre étude se focalise sur l'effet de la température de calcination des déchets de poudre de brique à basse température (600C°,800C°, 1000C°) et déchets sans calcination, ainsi qu'une procédure de broyage pour avoir une finesse de Blaine semblable au brique témoin d'environ 5200g/cm².

Le produit obtenu est ensuite utilisé pour la préparation des mortiers normaux. Une autre procédure est aussi utilisée pour améliorer les temps de début et de fin de prise, avec l'ajout d'un activateur alcalin NaOH avec différentes pourcentage (2%, 4%, 6%, 8%).

Les mortiers confectionnés sont testés à l'état frais et durci, pour avoir une combinaison d'activation adéquate, vis-à-vis de la consistance, la maniabilité, les résistances mécaniques et de la durabilité des mortiers activés.

3. Subdivisons du travail

Ce mémoire contient trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur le mortier, leur caractéristique à l'état frais et durci ainsi sur la valorisation de déchets de brique comme poudre et leurs activation mécaniques et chimiques.

Le deuxième chapitre consiste à étudier les différentes caractéristiques des matériaux utilisé dans cette étude, le protocole des essais.

Dans le troisième chapitre on a commenté et interpréter les résultats obtenus, afin de comprendre l'effet de la réactivation mécanique, et chimique sur les propriétés physico-mécaniques des déchets de brique.

Finalement, à travers les résultats importants de cette étude, on a présenté à la fin de cette mémoire des conclusions générales.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Les considérations économiques et environnementales affectent de plus en plus l'approvisionnement des déchets. Il y a des grands défis à la réalisation et au sens opposé des grandes objections à l'ouverture de nouveaux bancs de carrières. En même temps, on se heurte, des difficultés pour déposer à la décharge et de sous-produits inertes de l'industrie et, à l'existence des décharges sauvages qui affectent l'environnement.

Ces types de résidus peuvent être transformés en vue de leur utilisation dans la fabrication du béton. L'usage de déchet de brique pour la fabrication du béton est jugé. Le niveau bas de recyclage de ce dernier peut être à cause de manque des recherches dans leur application et utilisation en construction des routes. Il faut ajouter que la brique à cause de son mauvais comportement en compression et avoir un haut degré d'absorption d'eau ne peut pas être utilisée facilement dans le béton.

Ce genre de déchets est une menace sérieuse pour l'environnement et hygiène des eaux souterraines de surcroît, il a un aspect qui frappe désagréablement à l'œil. Le traitement nécessaire des déchets n'est pas simple, parfois s'est plus onéreux, et demande des connaissances spécialisées, puisqu'aucun de ces matériaux n'est normalisé.

I.2. Mortier normalisé

Est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le mortier normal est le mélange d'éléments secs 1 :3 avec un rapport E/C = 0,5.

I.2.1. Séquence de malaxage

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau I. 1. Opérations de malaxage du mortier normal

.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable	Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide

Le mortier prêt, le verser dans des moules prismatiques 4x4x16 cm. La mise en place est réalisée par vibration.

I.3. Politique de recyclage en Algérie

L'Algérie est entrain de connaître un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, le plus souvent de manière anarchique qui a vu la prolifération de l'habitation précaire. Cela ne s'est pas fait sans conséquences sur l'environnement.

Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 MDZ, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD)**[1].** Le secteur de l'environnement connaît actuellement des mutations à travers notamment le renforcement du cadre institutionnel et juridique.

- Sur le plan législatif et réglementaire, plusieurs lois ont été promulguées :
  - Loi n 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
  - Loi n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.
  - Loi n°02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.
  - Loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'Environnement dans le cadre du développement durable.
  - Loi n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.
  - Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
  - Loi n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable
  - Ratification par l'Algérie du Protocole de Kyoto
  - Entrée en application de la fiscalité écologique en janvier 2005.
- Sur le plan institutionnel, création de plusieurs organismes :
  - Le Centre National des Technologies de Production plus Propres (CNTPP) ;
  - L'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable ;
  - L'Agence Nationale des Déchets.
  - Le Conservatoire National des Formations à l'environnement
  - Le Centre National de Développement des Ressources Biologiques
  - Le Commissariat National du Littoral.
  - Le Centre National des Technologies de Productions plus Propres.
  - Le Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable.

I.4. Valorisation des Déchets de la Construction/Démolition

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton.

Zhen H. D. et al **[2]**ont étudié l'effet de l'ajout de trois types de granulats recyclés (10-20 mm) issus des bétons de classe de résistance différentes (30, 45, 60 et 80 MPa) sur les performances mécaniques et la durabilité d'un béton ordinaire. Les résultats expérimentaux de cette étude, en termes de résistances mécaniques (compression et traction), module d'élasticité, retrait de séchage et pénétration des ions chlore ont montré qu'on peut utiliser des granulats recyclés de bonne qualité (présentent une faible couche de mortier à la surface et un faible coefficient d'absorption) pour formuler un béton avec des performances comparables à celles mesurées pour un béton à base de granulats naturelles.

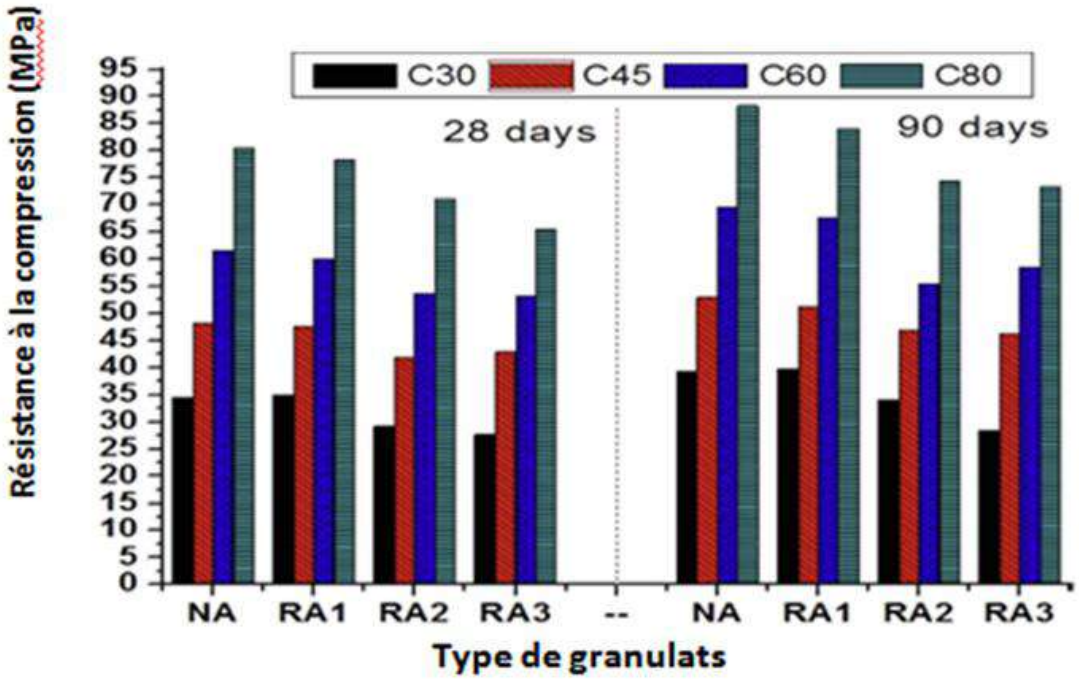


Figure I. 1..Effet de type de granulats recyclés sur la résistance à la compression d'un béton[2]

Kenai S. et Debieb F.**[3]**, ont travaillé sur le béton recyclé en remplaçant partiellement le gravier et le sable naturel (25, 50, 75 et 100%) par de gros, fin, et mélange de gros et fin granulats à base d'ancien béton et de brique cuite concassées. Par comparaison avec un béton hydraulique à base de 100% de granulats naturelles, les résultats de cette étude ont mis en évidence que l'absorption d'eau des bétons recyclés est élevée, la perméabilité à l'eau peut atteindre le double, le retrait est très important. Finalement ils ont trouvé que les propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de granulats recyclés peuvent être acceptables.

Dans d'autres travaux de Debieb F. et son équipe de recherche sur l'effet des granulats recyclés contaminés sur les performances mécaniques et la durabilité d'un béton courant **[4]**,les résultats expérimentaux montrent que les granulats recyclés contaminés par les chlorures ont un effet néfaste sur les caractéristiques du béton par rapport aux granulat. Une déférence importante a été observée entre les propriétés des bétons recyclés et ceux des bétons naturels.

I.5. Valorisation des déchets et sous forme des additions

I.5.1. Laitiers de haut fourneau

Boukendekdji O **[5]** ; a montré que les variations des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} respectivement, de la boite en L en fonction de la teneur en laitier. Il a remarqué que le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 15% puis commence à grimper indépendamment de la nature du superplastifiant. Cette augmentation du temps d'écoulement s'explique par la présence de ségrégation dans le mélange. Le meilleur temps est enregistré pour une teneur de 15% puis ce dernier augmente. Cette augmentation s'explique par la ségrégation qui peut être caractérisée par le blocage des gros granulats derrière les bars d'aciers. L'étude des vitesses d'écoulement a montré que pour le mélange contenant le superplastifiant PC avec 15% de laitier, la vitesse d'écoulement entre l'instant d'ouverture de la trappe et la distance de 20 cm (qui correspond au temps T20 sec) est de 0,18 m/s. La distance entre 20 et 40 cm (qui correspond au temps T40 sec) est parcourue à une vitesse égale à 0,27 m/s. Ceci montre que la vitesse d'écoulement augmente au fur et à mesure que le béton s'étale sur le deuxième compartiment (horizontal) de la boite en L. Si les vitesses des mélanges contenant le PC avec ceux contenant le PNS, les premières sont plus élevées, ce qui suggère que le PC procure au mélange plus d'ouvrabilité que le PNS.**[5]**

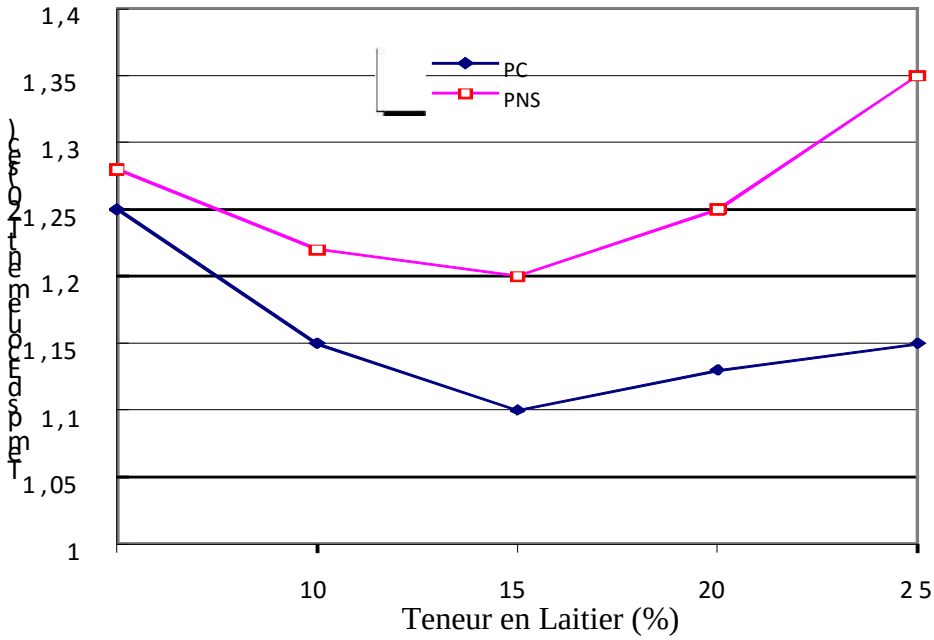


*Figure I. 2.Temps d'écoulement T20 en fonction de la teneur en laitier***[5]**

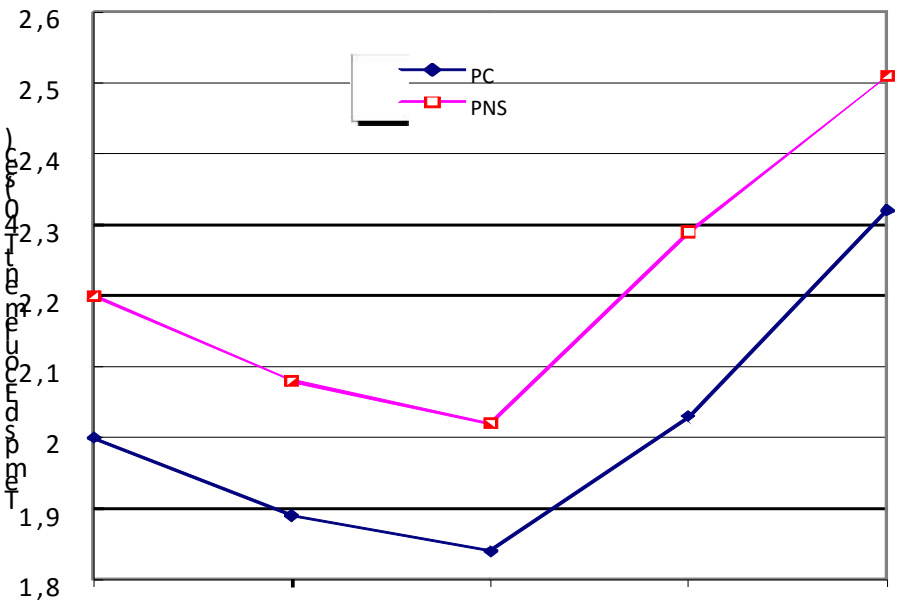


Figure I. 3.Temps d'écoulement T40 en fonction de la teneur en laitier[5]

Li et Ding **[6]**ont trouvé que l'incorporation du laitier à raison de 20% à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité.

Boukendekdji O **[5];** a montré la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en laitier à différents âges. Une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange est observée à tous les âges. En effet, à 28 jours et en chiffres, cette diminution équivaut à 7,36%, 11%, 23,85% et 28,90% respectivement pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25%. Néanmoins a remarqué que la diminution de la résistance à la compression est moins importante dans le cas des âges avancés (56 et 90 jours après malaxage), la comparaison des résistances à la compression pour les deux teneurs en laitier, 0% et 15%, a remarqué que la différence à 28 jours était de 7,69 MPa, pour diminuer à 4,30 à 56 jours et 3,92 à 90 jours, soit une diminution de 44% et 49% respectivement.

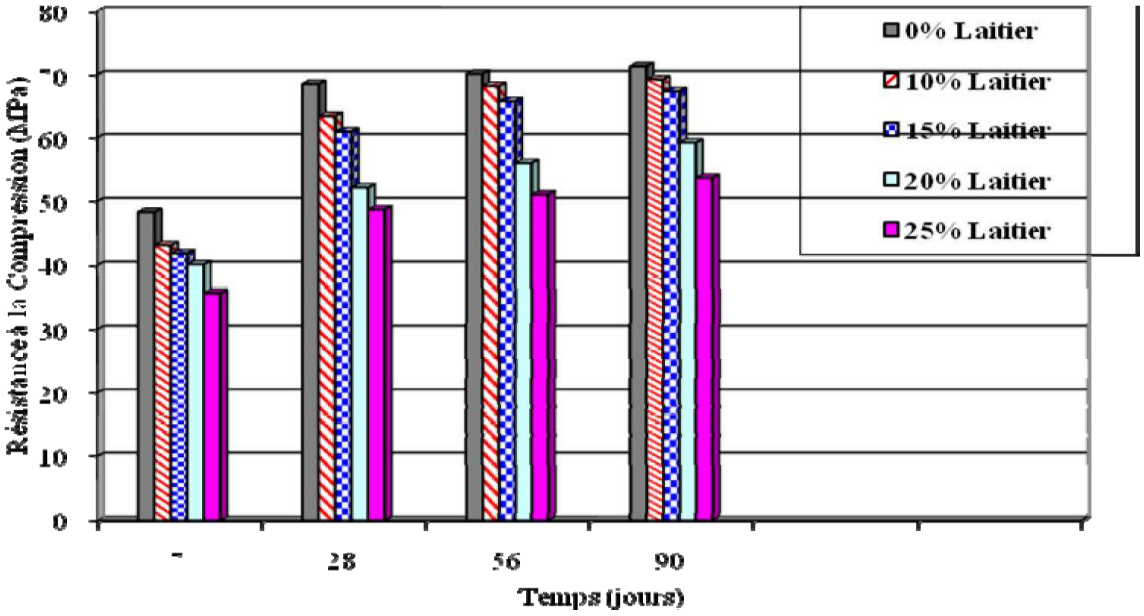


Figure I. 4..Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps[5]

Amrane et Kenai **[7]** ont introduit le laitier, par substitution, jusqu'à 50%. Ils ont observé une diminution de la résistance jusqu'à 28 jours, pour tous les pourcentages de substitution, mais à 90 jours, et pour 15% de substitution du ciment par du laitier, ils ont enregistré une résistance nettement supérieure à celle du béton de référence.

Bougara et al **[8]** ont expliqué les propriétés mécaniques faibles, à jeune âge, du béton à base de laitier par la lente réactivité du laitier. Ils ont aussi trouvé que la résistance à la compression à long terme augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier. Néanmoins une augmentation de la finesse de 360 à 420 m²/kg n'augmentera pas significativement la résistance, il n'y a donc aucun intérêt à broyer le laitier au-delà de 360 m²/kg. Enfin ils ont constaté que la résistance à jeune âge augmente et la résistance à long terme diminue.

Khatib et Hibbert **[9]** ont observé un effet similaire du laitier sur le développement de la résistance à la compression sur quatre mélanges de BAP à différentes teneurs en laitier 0%, 40%, 60% et 80%. Ils ont observé une diminution systématique de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en laitier durant les stades avancés d'hydratation. Au-delà de 28 jours et jusqu'au moins 90 jours, la présence du laitier a été hautement bénéfique à 40% et 60% de substitution dépassant même la résistance du béton de control. Une remarquable diminution de résistance, pour tous les ages, a été observée pour les mélanges des BAP contenant 80% de laitier.

Behim et al **[10]** ont trouvé des valeurs maximales de la résistance à la compression à 28 jours aux environs de 55 MPa entre 10 et 15% de teneur en laitier. Au-delà de cette teneur, les résistances diminuent considérablement.

Li et Ding **[6]**ont rapporté que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore nettement sa résistance à la compression.

Borsoi et al **[11]** ont trouvé que la résistance à la compression du BAP avec du laitier ou bien avec du laitier-Cendres volantes est plus élevée que celle du BAP avec les cendres volantes uniquement, en particulier aux jeunes âges.

Öner et Akyuz **[12]** ont rapporté que la résistance à la compression des mélanges de béton contenant du laitier augmente avec l'augmentation de la quantité de laitier. Au-delà d'un optimum d'environ 55% de substitution du ciment par du laitier, la résistance à la compression cesse d'augmenter en raison de la présence de laitier sans réaction qui agit uniquement comme un filler dans la pâte.

Chidiac et Panesar **[13]** ont introduit le laitier jusqu'à 60%. Pour un rapport E/L = 0,38, ils ont trouvé que la résistance à la compression du mélange, à 28 jours est à son maximum pour 20% de laitier et qu'au-delà, la résistance rechute. Le gain de résistance à 120 jours par rapport à 28 jours est de 10%.

O'Rourke et al **[14]** ont trouvé qu'au-delà de 28 jours les résistances à la compression des bétons contenant du laitier se rejoignent avec celles du béton de référence.

Naceri et al**[15]**. Utilisait un ciment, du laitier avec un broyage à jusqu'à l'obtention de la finesse de (3500 cm2/g et 4200 cm2/g) pour des différents dosages choisis de 0 à 45% avec in pas de 15% par rapport au poids de ciment. **[15]**Il a étudié mortier normal avec C/S = 1/3 et E/C = 0,5. Les propriétés physiques étudiées sont : la consistance normale et le temps de début et de fin de prise déterminées par l'essai de Vicat des pâtes pures des ciments préparés (clinker + laitier + gypse + Eau) à deux finesses de mouture différentes (3500 cm2/g et 4200 cm2/g). Les propriétés mécaniques étudiées des mortiers préparés sont la résistance à la compression et à la flexion sur des éprouvettes normalisées 4 x 4 x 16 cm3. Les résultats obtenus, montrent que l'augmentation du pourcentage du laitier permit de :

•L'augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte du liant.

•L'augmentation proportionnelle des temps de début et de fin de prise.

•L'obtention d'un mortier de résistance acceptable de la quantité de 45% du laitier.

Il a aussi conclu que l'augmentation de la finesse de mouture du liant contribue à une augmentation de la consistante de la pâte de ciment avec ou sans ajout et améliore nettement les résistances mécaniques pour le mortier contenant jusqu'à 30 % de laitier (résistances comparables à celles d'un mortier témoin)**[15]**.

Boukendekdji O **[5]** a montré la variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur en laitier. Tout comme les résistances à la compression, les résistances à la traction diminuent avec l'augmentation de la teneur en laitier. De la même manière évalue cette

diminution à 28 jours, elle équivaut à 4,81%, 10,63%, 18,35% et 24,81% respectivement pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25%. La diminution est moins importante à 90 jours d'âge, la comparaison des résistances à la traction pour les deux teneurs en laitier, 0 et 15%, a remarqué que la différence à 28 jours était de 0,84 MPa, pour diminuer à 0,49 à 90 jours, soit une diminution de 42%., la diminution de la résistance à la traction est moins importante que celle de la résistance à la compression et ce pour tous les taux de substitution du ciment par du laitier.

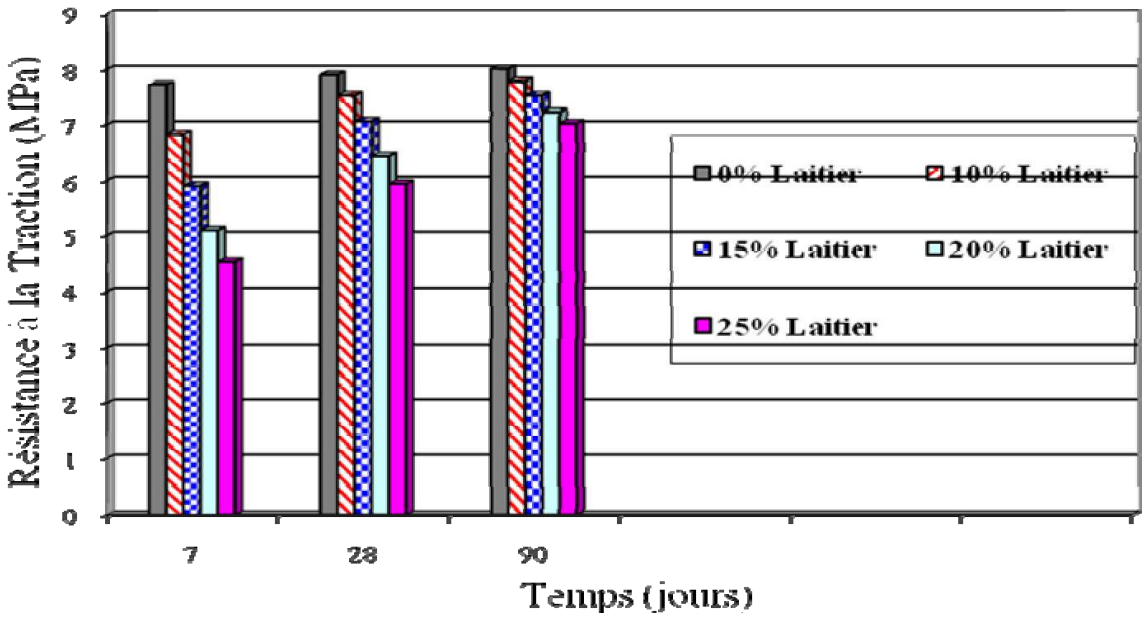


Figure I. 5.Variation de la Résistance à la Traction en fonction du Temps[5]

Felekoglu et al **[16]** ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances à la traction élevée comparées à celles des bétons traditionnels.

Selon Klug et Holschemacher**[17]** , la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés et peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferraillage. Behim et al **[10]** ont rapporté, à peu près, les mêmes conclusions que celles des résistances à la compression. Les valeurs maximales de la résistance à la traction à 28 jours avoisinent les 9 MPa entre 10 et 15% de teneur en laitier. Au-delà de cette teneur, les résistances diminuent considérablement. Ils ont conclu ensuite que la finesse du laitier agit favorablement sur les résistances mécaniques.

D'après Domone **[18]** le rapport entre les résistances à la traction et à la compression pour le BAP est très similaire à celui des bétons ordinaires.

Boubekeur et al**[19]** ont étudié aussi l'effet de l'incorporation de différentes quantités de laitier sur les résistances mécaniques des ciments à base du calcaire, l'utilisation du laitier broyé à une finesse d'environ 3400 cm2/g avec le laitier broyé à 3900 cm2/g de finesse. Les résultats obtenus montrent que la substitution du ciment par du laitier a donné des faibles résistances à la compression à jeune âge (2 à 7 jours). Cependant, la résistance des ciments au laitier se rapproche à celle du CEM I à 90 jours, particulièrement pour les ciments avec 20 % et 30 % de laitier.

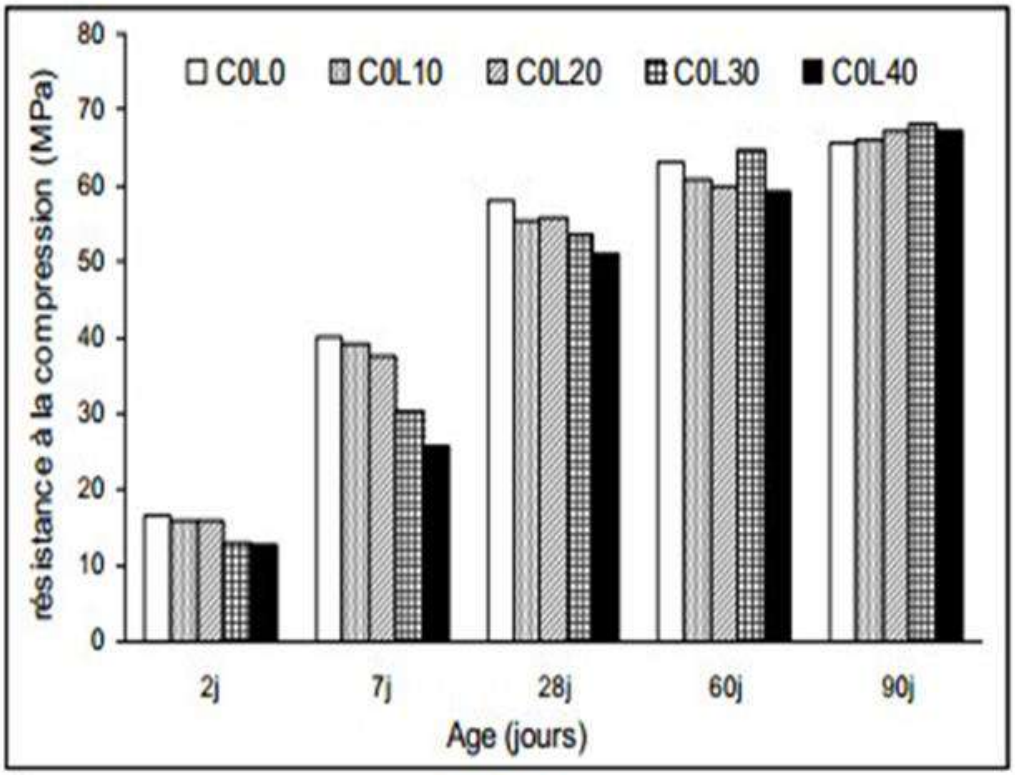


*Figure I. 6.Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression**[19]***

I.5.2 . Pouzzolane naturelle :

Otmanine S et al **[20]** ont décidé de fixer l'affaissement à **18cm ± 1cm** pour faciliter l'étude des résultats, et pour cela ils ont varier le dosage de superplastifiant afin de gardé un affaissement constant. Comme ils ont aussi fait cet essai sur deux différent rapport E/C pour cela ils ont utilisé la pouzzolane naturelle. Ils ont remarqué que le dosage de superplastifiant augmente avec l'augmentation de substitution de la pouzzolane naturelle. Aussi que plus le rapport E/C diminue, plus le dosage de superplastifiant augmente car plus la quantité d'eau diminue plus elle sera remplacée par un certain pourcentage de superplastifiant.

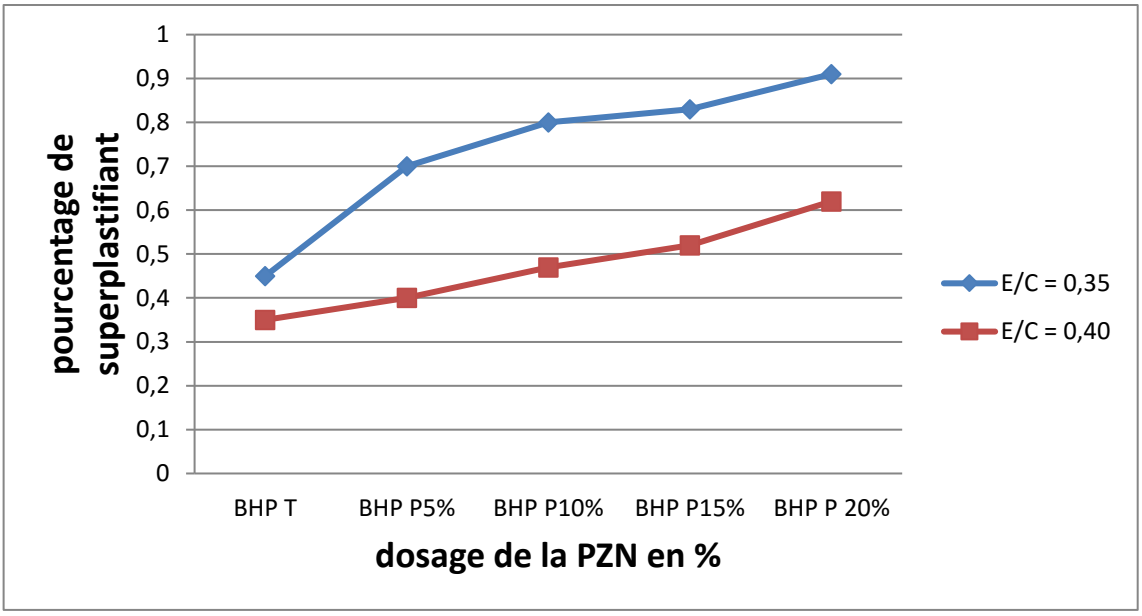


Figure I. 7.Rapport du dosage de superplastifiant avec la variation de substitution de la pouzzolane naturelle, et cela en deux différent rapport E/C[20]

Otmanine S et al [20] ont remarqué que la résistance augmente progressivement à travers l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle avec la même cinétique jusqu'à un optimum de 15% de substitution ensuite une décente de résistance se suit et cela est dû à les réactions pouzzolaniques de la pouzzolane naturelle qui améliore la compacité du béton et qui donne une meilleur résistance . La Figure III.8 montre clairement que la résistance à la compression avec un rapport E/C =0.35 et plus grande que celle du rapport E/C =0.40.

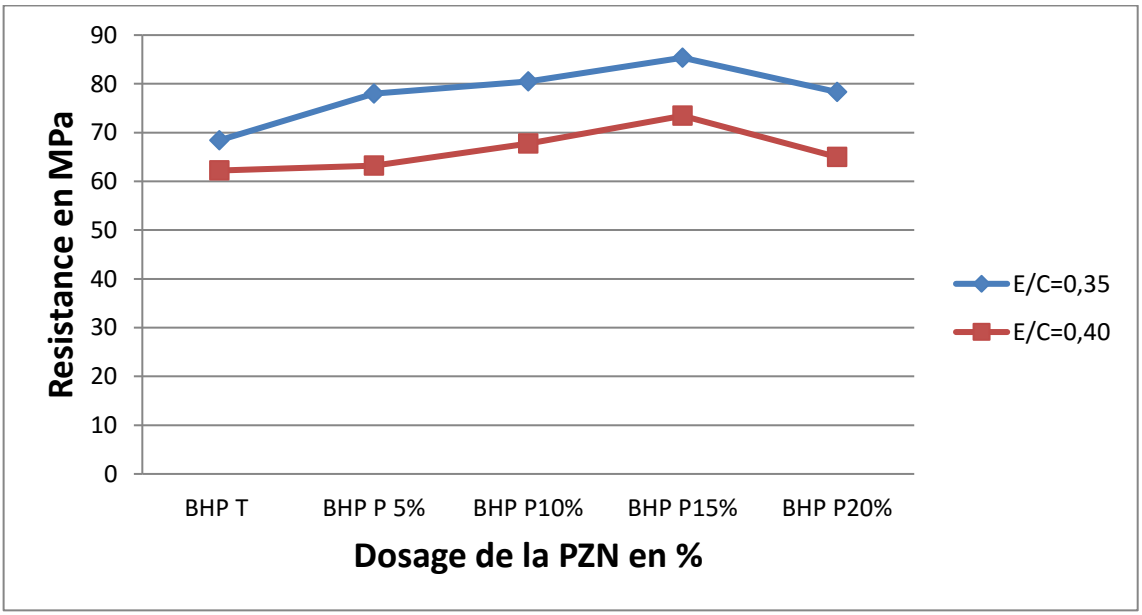


Figure I. 8.Comparaison entre la Résistance a la compression de PZN[20]

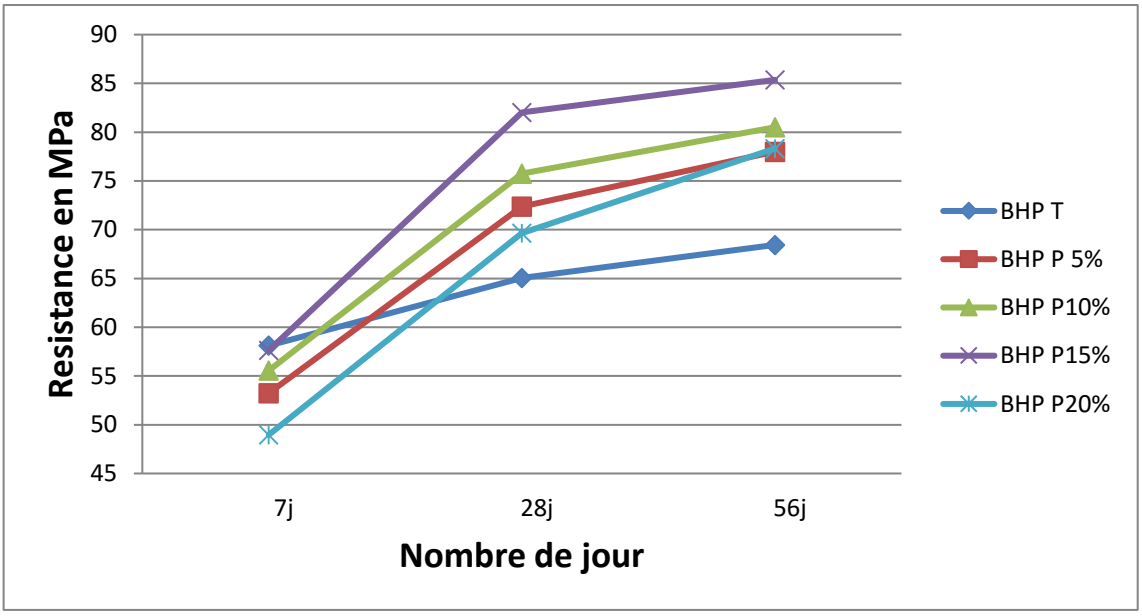


Figure I. 9.Augmentation de la Résistance a la compression de PZN a E/C=0,35 à travers le temps[20]

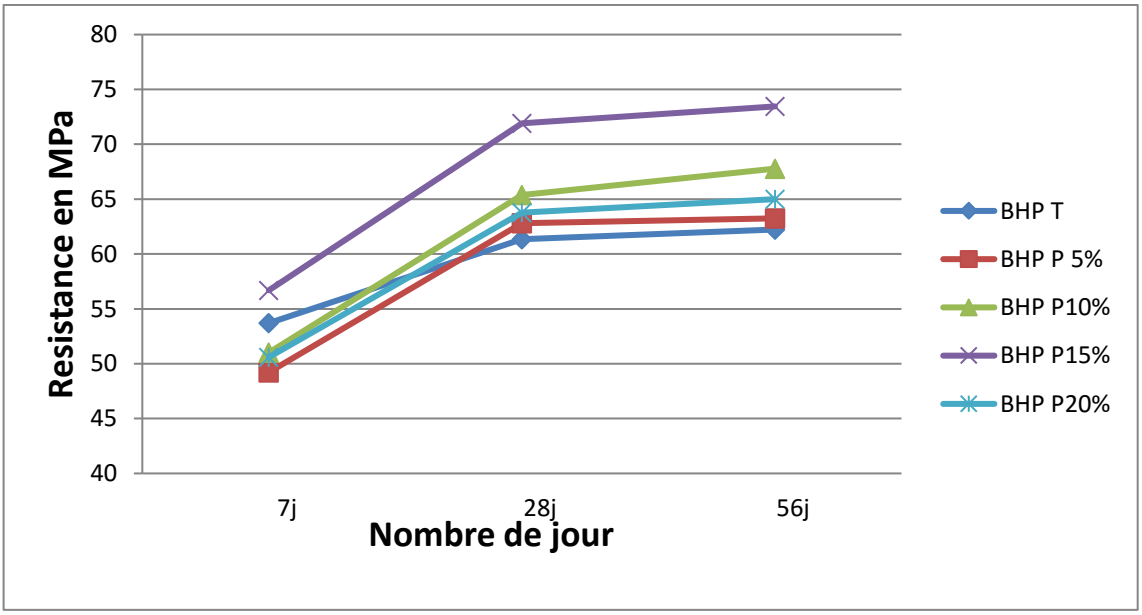


Figure I. 10.Augmentation de la Résistance a la compression de PZN a E/C=0,40 à travers le temps[20]

La Figure 9 et 10 montre que la résistance à la compression est faible à jeune âge (7j), même que le BHP T est supérieur au BHP à base de PZN avec un écart moins important. Ceci peut être due à l'activité pouzzolaniques de la pouzzolane naturelle qui est lente à cet âge de conservation.[20]

Même chose pour la traction que la résistance augmente progressivement de la même cinétique à travers l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle jusqu'à un optimum de 15% de

substitution. Figure I.10 montre clairement que la résistance à la traction avec un rapport E/C =0.35 et plus grande que celle du rapport E/C =0.

La Figure III.11 et III.12 montre que la résistance à la traction est faible a jeune Age (7j) , puis elle augmente rapidement jusqu'au 28j , ensuit l'augmentation ralentie et se stabilise à long terme (56j).**[20]**

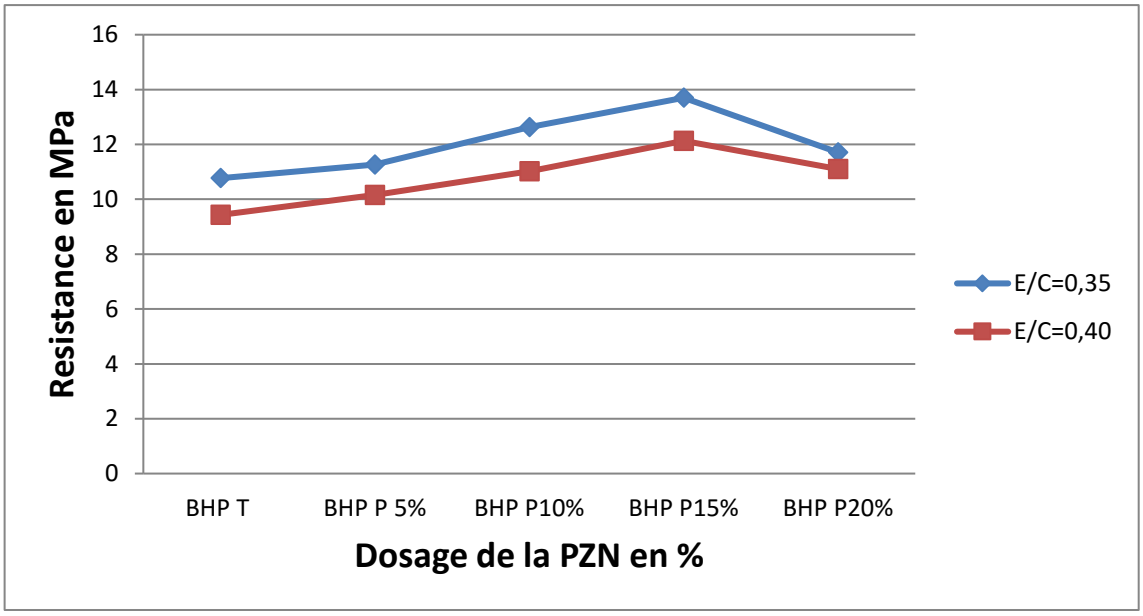


*Figure I. 11.Comparaison entre la Resistance a la traction de PZN***[20]**

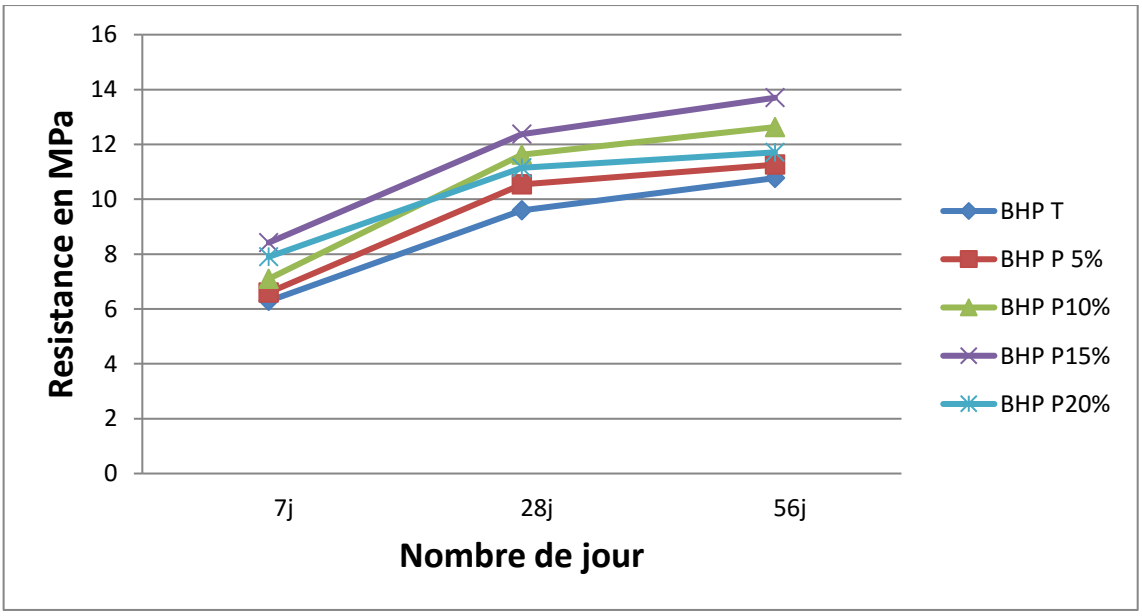


*Figure I. 12.Augmentation de la Résistance a la traction de PZN a E/C=0,35 a travers le temps***[20]**

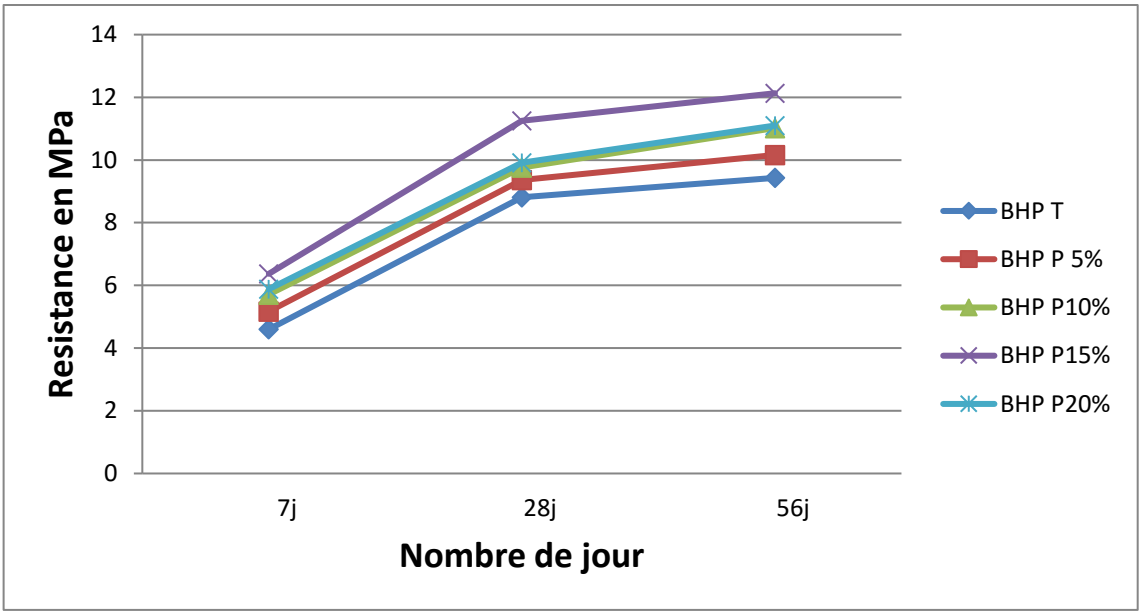


Figure I. 13.Augmentation de la Résistance a la traction de PZN a E/C=0,40 à travers le temps[20]

Otmanine S et al [20] ont mesuré le taux d'absorbation d'eau de n différent mélanges ,et cela avec la mesure de la masse à chaque temps précis .

:

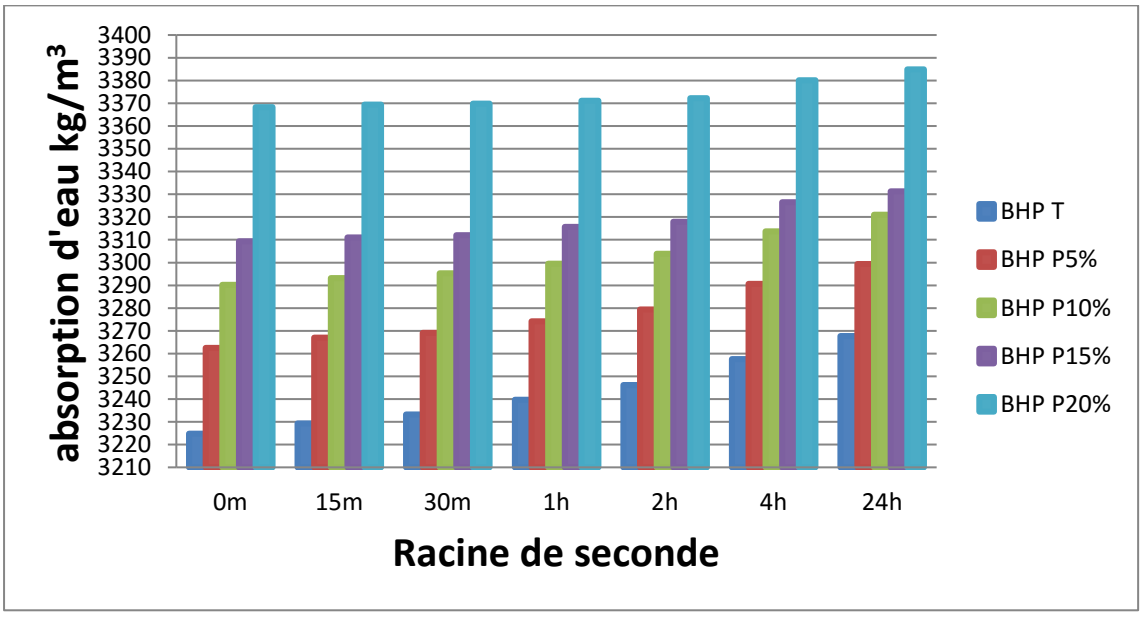


Figure I. 14.Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.35[20]

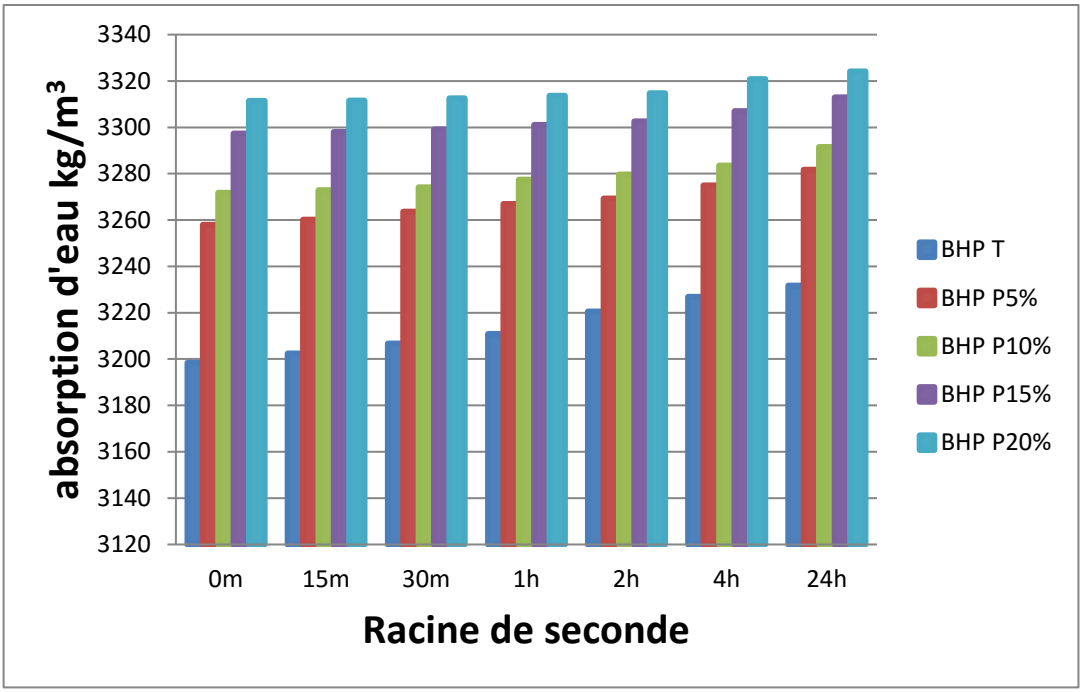


Figure I. 15.Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.40[20]

Les figure 16 montrent que l'absorption de l'eau par capillarité diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle et cela est due aux réactions pouzzolaniques de la pouzzolane qui permet l'amélioration de la compacité d'où une diminution de l'absorption capillaire. [20]

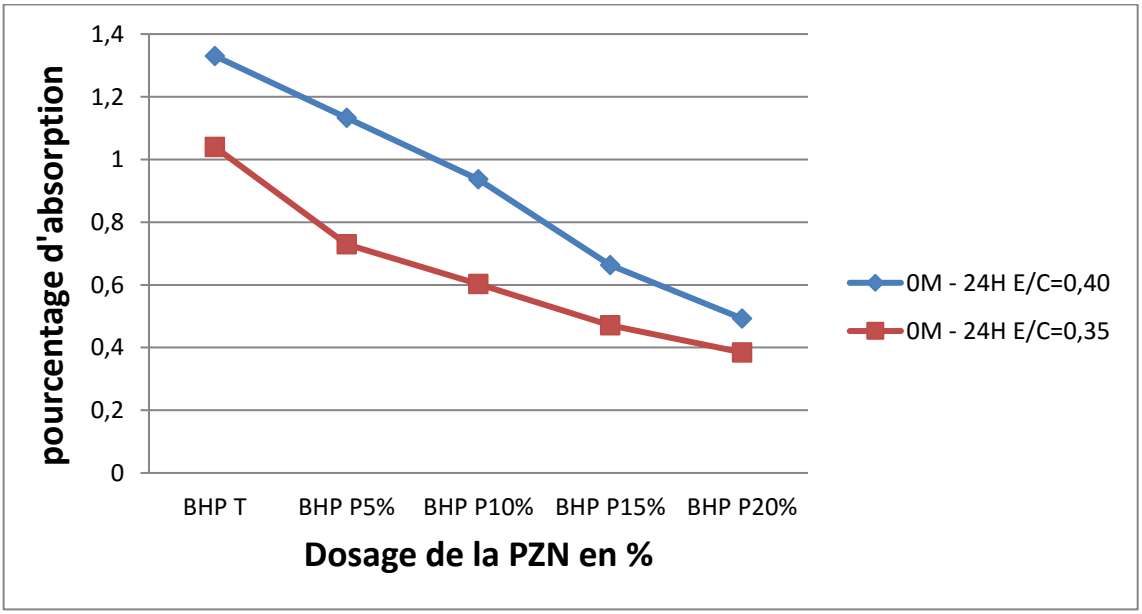


Figure I. 16. Différance de pourcentage d'absorption entre différent teneur en pouzzolane naturelle et rapport E/C[20]

BENKADDOUR et al. [21] dans leur étude ont trouvé que la résistance en compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle de Béni-saf à jeune et à moyen terme (2, 7 et 28 jours).

I.5.3. Les cendres volantes

Provenant de la combustion des charbons dans les centrales thermiques, peuvent être utilisées à la fabrication des ciments, à l'exécution des bétons, ou elles remplacent en partie de la ciment portland, à la production des granulats légers et d'autres matériaux de construction, ainsi qu'à l'exécution des remblais dont elles ont un effet favorable grâce à leurs faibles poids.**[22]**

AMOURI C. et HOUARI H. **[23]**, a pour but d'examiner l'effet des additions minérales, chimiquement inertes ou pouzzolaniques (fillers calcaires et cendres volantes), sur les performances à l'état frais et durci des mortiers. Les paramètres de l'étude sont la nature et la teneur de l'addition minérale. Le taux de substitution du ciment par l'addition est 10 et 20% en masse.

I.5.4 . Terre cuite

Les débris de terre cuite sont, généralement, classés parmi les déchets de démolition, que ce soit du point de vue recyclage ou réutilisation comme granulat léger. En effet, ceux sont : l'argile cuite non moulée (chamotte), l'argile cuite, les briques concassées, les surcuits et les incuits de briqueteries, ainsi que les débris de briques contenus dans les déchets de démolition et les décombres, qui sont désignés sous le nom collectif de < débris de terre cuite >**.[24]**

Par commodité, quoi qu'il en soit et suite l'axe de notre recherche qui s'intéresse aux déchets de brique de briqueteries, nous les classeront permis les sous-produits et l'industrie.

En Algérie, la brique en terre cuite est le plus fréquemment utilisée comme élément de maçonnerie dans le secteur du bâtiment. Vu le développement économique de l'Algérie qui s'est engagée en domaine de construction et dans le cadre de valorisation d'utilisation des matériaux locaux, en 1989, l'état algérien a en courage l'industrie de fabrication des produits rouge. A cet éparque, il y avait que 12 projets de production qui ont été initiés durant l'année 1988 et l'offre, estime à un taux de satisfaction de 45%, était loin de satisfaire le marché national. Les besoins prévus jusqu'au l'an 1994, étaient de l'ordre de ces millions tonnes/an en produit rouge et 5 million tonnes/an pour les tuiles **.[25]**

I.5.5 . Poudre de marbre

L'étude de SAADANI S. **[26]**, consiste à comparer les propriétés d'un béton de référence à l'état frais et durci, à celles des bétons incorporant des granulats de marbres en substitution d'une fraction volumique du sable, de graviers et les deux ensembles avec des taux de substitution de (25%, 50%, 75%, 100%). Il se dégage de l'étude que le dosage et la classe des granulats recyclés sont, à courts termes, des paramètres de premier ordre. Les résistances en compression sont nettement favorisées par la classe de granulats recyclés quel que soit le dosage. Les mélanges à base de granulats substitués partiellement donnent les meilleures performances à l'état frais et durci du béton que ceux substituer totalement ou de référence.

L'étude effectuée par Hebhoub H. et Belachia M**[27]**, a pour but de mettre en évidence la possibilité d`utiliser le sable de déchets de marbre comme substituant dans la fabrication d'un béton hydraulique. Les auteurs ont étudié une série d`essais, « substitution de sable » avec un

rapport E/C (eau /ciment) constant pour une teneur en sable recyclé variable. L'étude consiste à analyser les propriétés mécaniques à l`état frais et durci des bétons avec un taux de substitution variable (25%,50% ,75% et 100%) et de comparer les résultats avec un béton témoin à base de granulats ordinaires. Les résultats de cette étude ont montré que la meilleure ouvrabilité est donnée par le béton de granulat ordinaire. Ceci peut être expliqué par la présence d'éléments fins du sable. Les mélanges à base de granulats substitués partiellement donnent les meilleures performances en compression que ceux substitués totalement ou de référence. La valeur maximale de la résistance en traction à 28 jours est obtenue avec le béton de 50% de taux de substitution. Cette recherche montre que les déchets de marbre peuvent être techniquement utilisés comme substituant danses bétons hydrauliques.

Chaid R. et al. **[28]**, ont étudié l'effet de l'addition d'une poudre de marbre finement broyée comme ajout cimentaire sur la durabilité des bétons en milieu marin. Les résultats de cette étude ont monté que Le remplacement partiel du ciment par la poudre de marbre ne contribue pas former un volume important de nouveaux produits hydratés capables de réduire la porosité des bétons même si la résistance en compression peut être plus ou moins améliorée. La contribution de la poudre de marbre a donc un rôle structurant des liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique, cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité par une réduction de la porosité et une meilleure résistance à l'agression chimique, la diffusion des ions chlore est systématiquement diminuée et la perméabilité superficielle réduite.

I.5.6 . Poudre de verre

Quelques chercheurs ont utilisé la poudre de verre, le verre est un matériau qui est déjà utilisé dans les matériaux de construction. En effet, le verre pilé s'utilise comme agrégat dans le béton, comme matériau de déchets siliceux dans la production de ciment Portland **[29]**et comme remplissage pour améliorer l'hydratation. Cependant, le meilleur rendement de l'addition de verre dans le béton s'obtient lors de son utilisation sous forme de poudre fine (taille de particules inférieure ou égale à 75 µm) comme remplacement du ciment. Le verre est amorphe et a une forte teneur en silice lui conférant d'intéressantes propriétés pouzzolaniques **[29]**

Zeroub H. **[30],** a étudié l'effet de l'ajout de 30 % de poudre de verre comme substituant du poids de ciment dans la formulation d'un BHP. L'auteur a montré que la poudre de verre améliore l'écoulement du béton tout en gardant la même quantité de superplastifiant. La résistance mécanique augmente d'une façon graduelle par rapport à celle du béton de référence. Aussi la poudre de verre il consolide d'avantage la matrice cimentaire ce qui rend difficile la pénétration des composés agressifs dans le béton.

I.5.7 . Poudre d'argile calciné

Ahlem Chakchouk et al **[31]**ont déterminé les propriétés chimiques, physiques et minéralogiques de l'argile kaolinitique locale brute et calcinée ont été étudiées détail afin de l'utiliser comme une pouzzolane artificielle. Le but de cette étude était d'étudier et d'optimiser la propriété des mortiers dans lesquels de l'argile calcinée est utilisée comme pouzzolane. Trois variables (temps de calcination : X1, température de calcination : X2 et % d'argile calcinée dans le mélange ciment : X3) une structure orthogonale composite rotative a été mise en place. Il a été conclu que le compressif les forces étaient déterminées par la température de calcination et le pourcentage d'argile calcinée dans le ciment mélangé. Il a été prouvé que les points forts

pouvaient être améliorés en augmentant simultanément le pourcentage d'incorporation et la température de calcination de l'argile. Il a également été démontré que à des températures inférieures à 700 ° C, l'augmentation du temps de calcination a amélioré la compression au-dessus de 700 ° C, l'effet inverse a été observé.

Enfin, une composition de ciment mélangé a été formulée et optimisé à l'aide des fonctions de désirabilité. Le ciment mélangé optimisé contient 25% d'argile calcinée, chauffée pendant 3 h à une température de 750 ° C. **[31]**

L'argile calcinée est utilisée comme pouzzolane dans le ciment mélangé. La réalisation d'un modèle composite rotatif, avec trois facteurs (temps de calcination, température de calcination et pourcentage de remplacement du ciment) suivi d'une optimisation utilisant la fonction de désirabilité nous permet de déterminer les meilleures conditions expérimentales conduisant à une maximisation des résistances à la compression à 7, 28, 90 et 180 jours.

Il a été démontré que : les propriétés mécaniques des ciments mélangés sont régies par la température de calcination et le pourcentage de ciment remplacement, en augmentant la température de calcination, il est possible d'augmenter le niveau de remplacement du ciment, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'argile calcinée car celle-ci contient une fraction élevée de minéraux non argileux qui agissent comme diluant, et parce que le broyage. **[31]**

I.5.8 . 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.

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.

I.5.8.1. Déchet de brique sous forme de poudre

NIGRI.G. et al.**[32]**, Ont cherché à élaborer un nouveau ciment composé à base de déchets de briques. Des résultats préliminaires montrent que l'incorporation de 5 à 15% de déchets de briques dans un broyeur à haute énergie, permet une amélioration des principales caractéristiques physiques (retrait, densités, expansion à chaud, etc.) du nouveau liant, avec des propriétés mécaniques comparables aux ciments portlands composés de classe de résistance normale de 42,5MPa.Les meilleures valeurs des caractéristiques et des propriétés physico mécaniques ont été obtenues pour un ciment contenant les proportions en masses suivantes : 85% de clinker + 10% de déchets de briques + 5% de gypse.

Ouzadid.S et al .**[33]** Ont étudiée de valoriser les déchets de la brique cuite dans le mortier autoplacant. Sont utilisées dans le mortier de poudre (PB) par substitution respective avec le sable naturel (25, 50 et 75%) et le ciment (5, 10, 15 et 20%).

Ouzadid.S et al**[33]** a observé que le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation du dosage d'ajout de PBR.

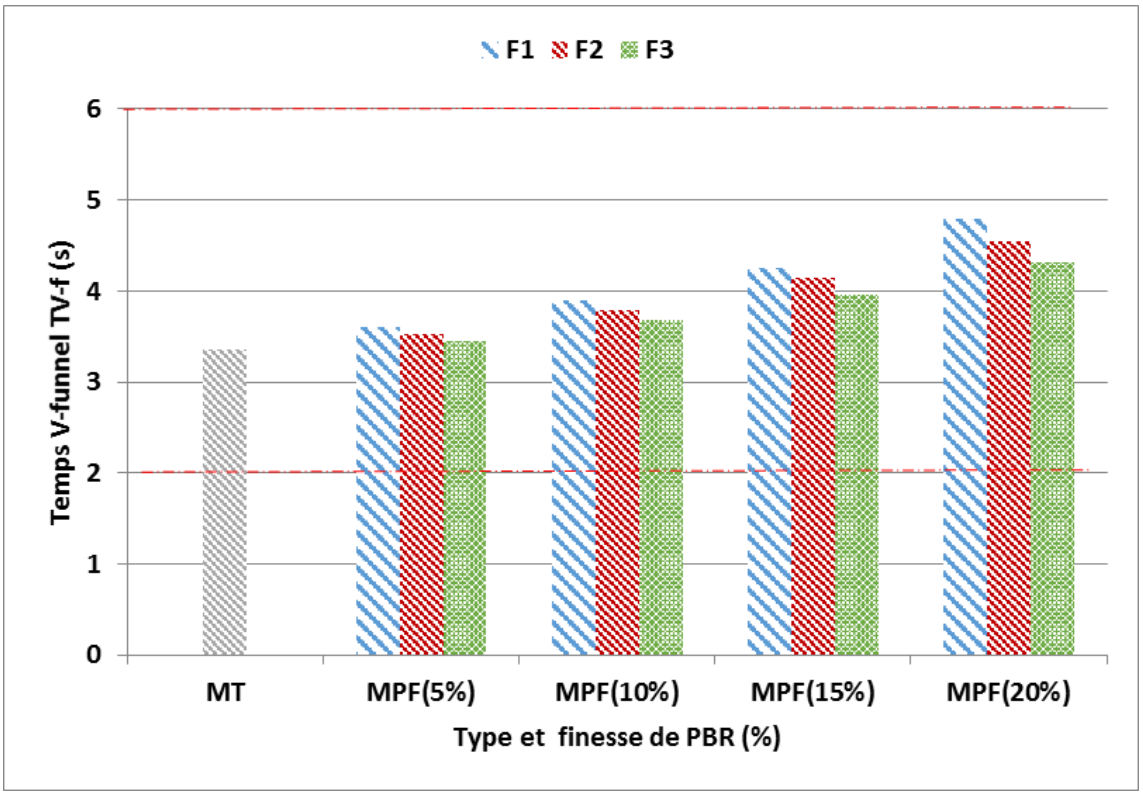


Figure I. 17.*Le Temps d'écoulement en fonction de MPfX*[33]

Les résultats expérimentaux ont montré l'effet positif des déchets de la brique sur le comportement du mortier autoplacant pour un pourcentage de substitution de 5% à 15% en PB (avec un optimum de 5%) et de 25% à 75 % en SB (avec un optimum de 25%). Coté économie, la substitution du ciment par 5% de PB donne un gain de 5% de ciment et une augmentation de 13% de Résistance en compression et de 107% de Résistance en traction. [33]

La variation de la résistance à la compression des mortiers à base de poudre de brique PBR de 3900g/cm^2 comme surface spécifique (SSB) et ont trouvé que l'évolution de la résistance suit la même cinétique ; pour les différents âges optimums de résistance pour le mélange qui contient 5% de substitution qui donne une amélioration de la résistance de 2% à court terme et environ 4%à long terme, au-delà de cette valeur ont constaté une diminution environ 25% à court terme et 14% à long terme. Donc à partir de ces résultats ont dit que le déchet de brique de cette finesse a une faible réaction pouzzolaniques.[33]

Le même constat a été enregistré pour les mélanges à base de 4300g/cm^{2,} sauf qu'à long terme la résistance a été meilleure que le mortier témoin par les dosages de 5,10 et 15%. À cette étape ont dit que la réaction pouzzolaniques est améliorée en fonction de l'augmentation de la surface spécifique. Nous avons obtenues des améliorations de la résistance de l'ordre de 7%.[33]
Concernent la troisième finesse la même cinétique a été enregistré ; obtenu des améliorations de l'ordre de 13% à long terme cela confirme que plus la finesse augmente plus la résistance augmente, cette augmentation est due probablement à l'augmentation de la réaction pouzzolaniques et l'amélioration de la compacité en fonction de l'amélioration de SSB. Ont remarqué que la résistance augmente en fonction de l'augmentation de finesse et présente la même cinétique au cours du temps. Sur la base, plus la finesse augmente plus la résistance à la compression augmente .[33]

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence Ciment-Granulats. Pour mieux saisir le sens de l'évolution relative de la résistance à la traction par flexion des différents mortiers autoplacant avec l'âge et fonction du taux de substitution de PBR, et permettre la comparaison avec les MT. **[33]**

Irki et al**[34]** ont trouvé une diminution des paramètres rhéologiques des mortiers autoplaçants à base de déchets de briques.

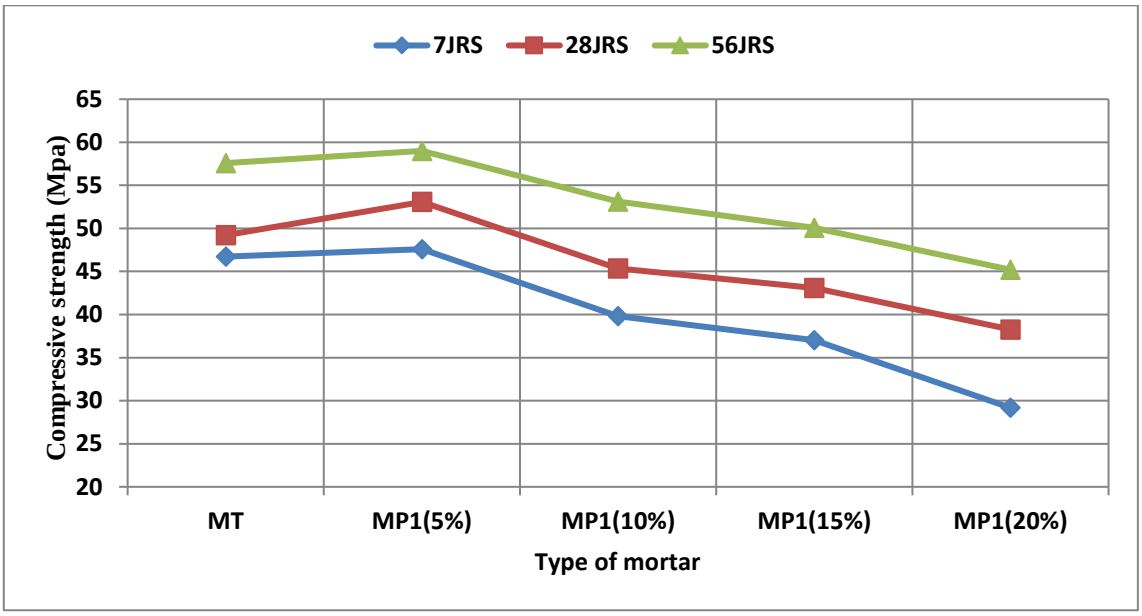


Figure I. 18.La résistance à la compression en fonction de substitution en poudre de briqueF1=3900cm2/g[33]

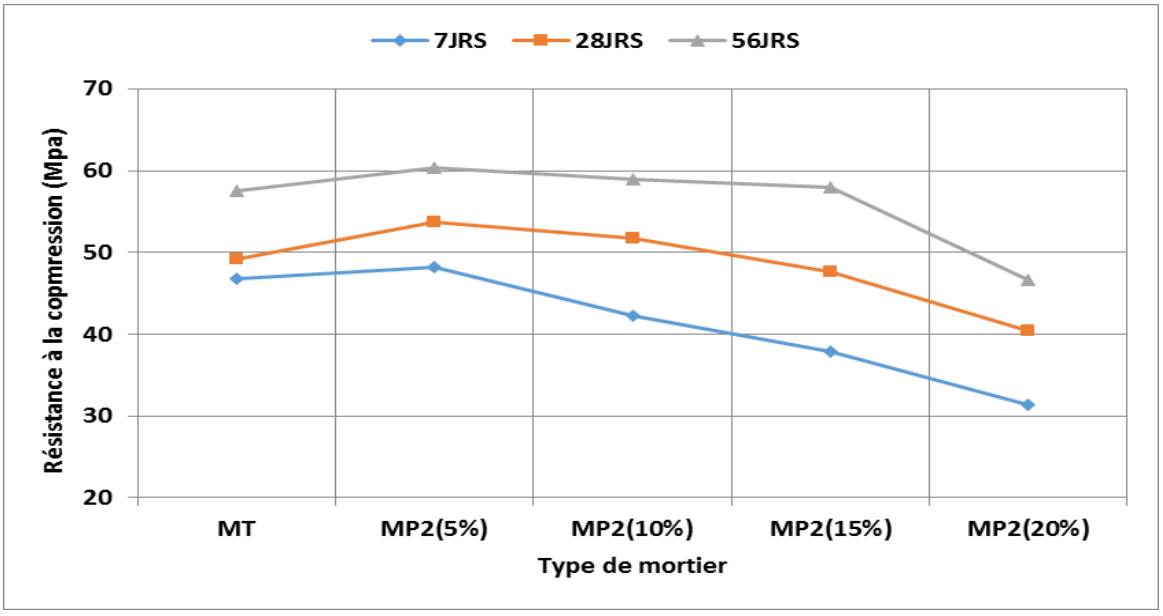


Figure I. 19.La résistance à la compression en fonction de substitution en poudre de brique F2=4300 cm2 /g[33]

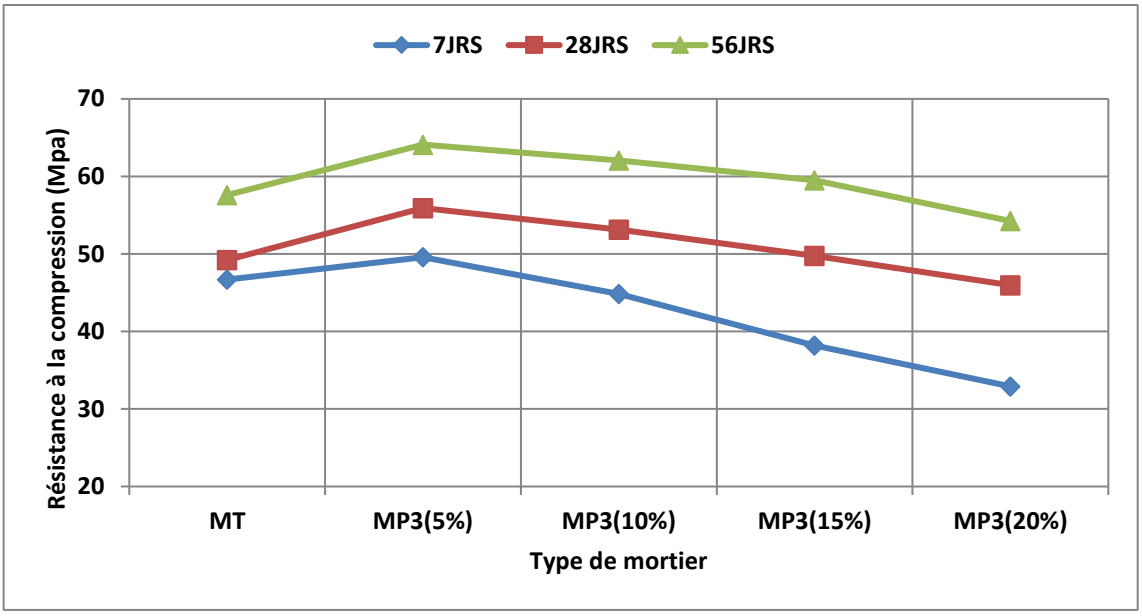


Figure I. 20.La résistance à la compression en fonction de substitution en poudre de F3=5200cm2 /g ***[33]***

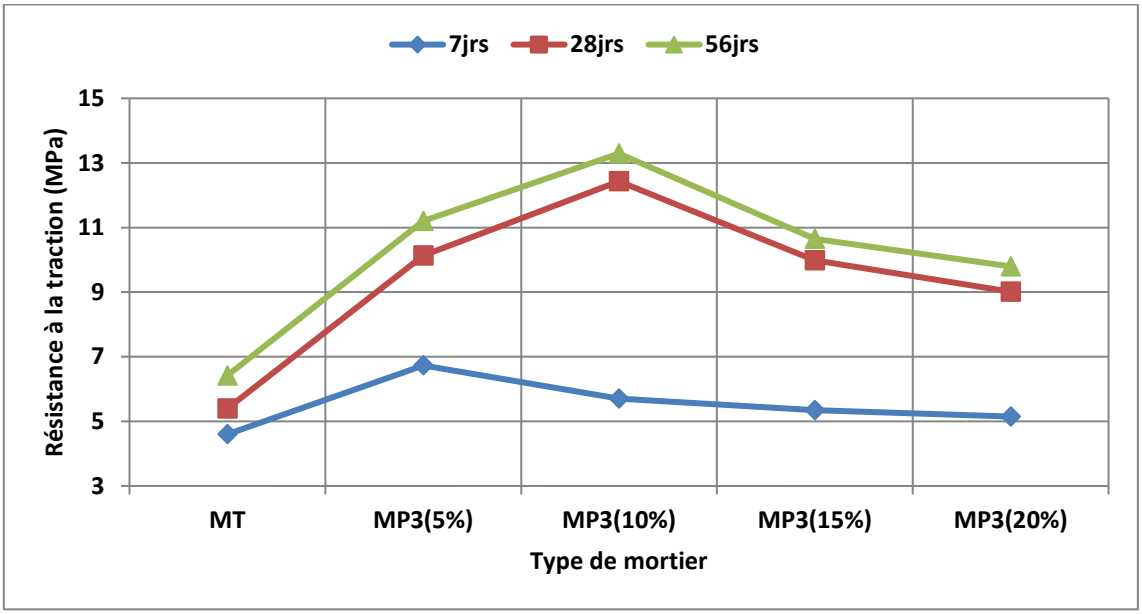


*Figure I. 21.La résistance à la traction en fonction de substitution en poudre de brique F3=5200cm2 /g****[33]***

[33]A constaté que plus l'augmentation de la substitution en PBR, plus l'absorption est diminuée ; cela peut exprimer l'effet des PBR sur la compacité, car le PBR a une réaction pouzzolaniques qui permettra l'amélioration de la compacité de ces mortiers. Ont dit que plus la valeur de surface spécifique de PBR augmente plus l'absorption est diminué.

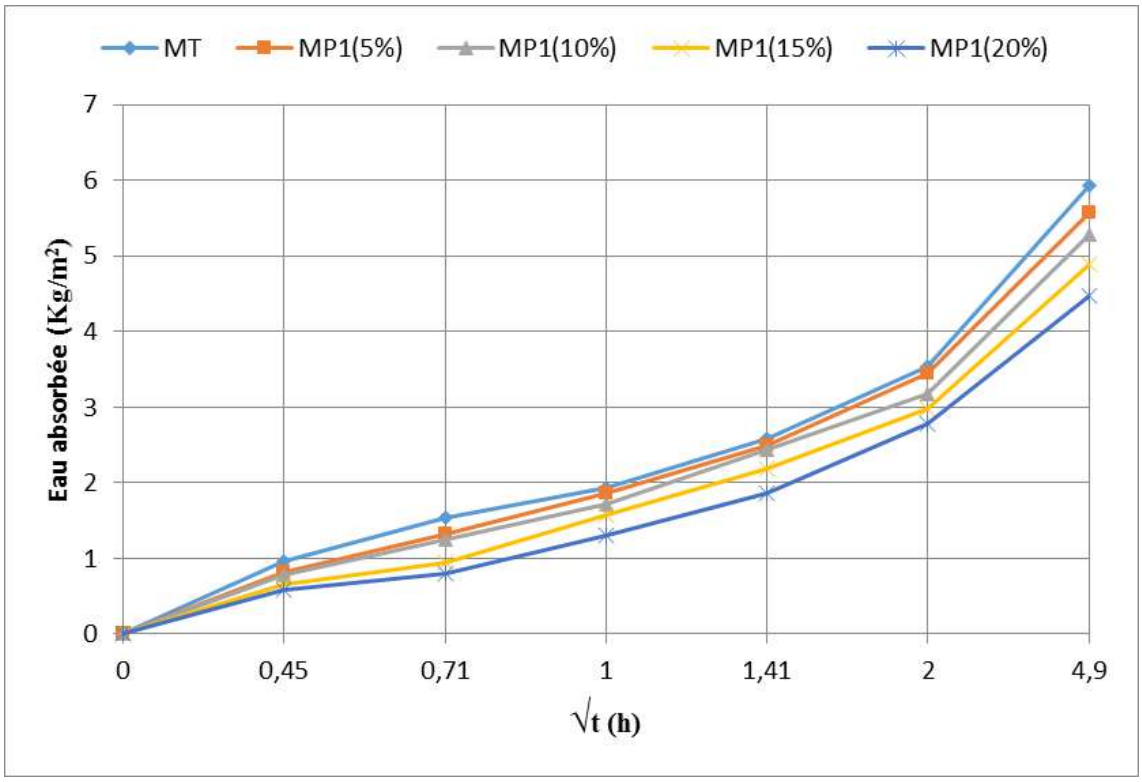


Figure I. 22.L'absorption d'eau en fonction du temps du MP1[33]

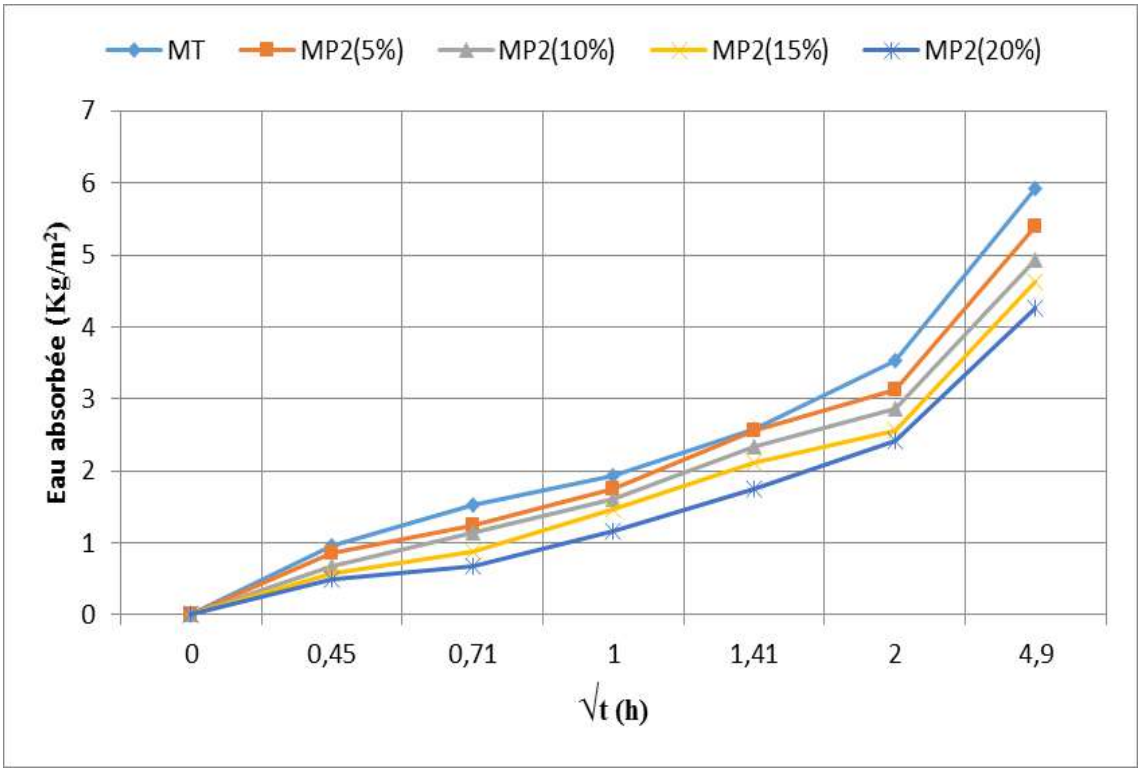


Figure I. 23.L'absorption d'eau en fonction du temps du MP2[33]

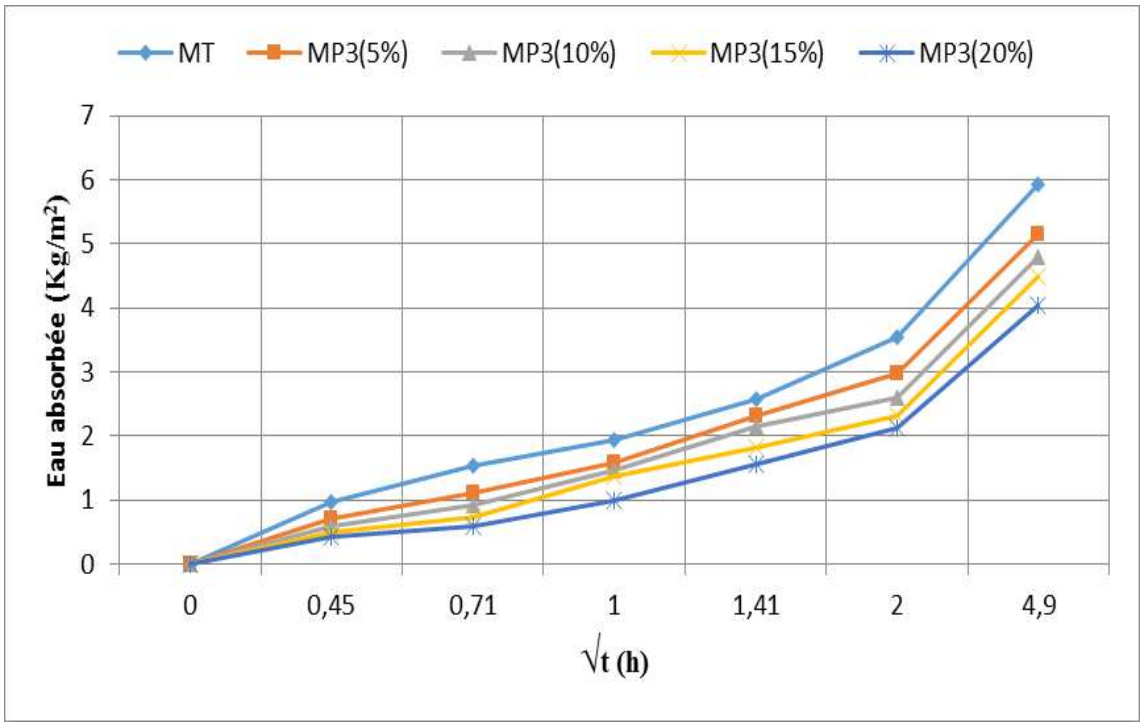


Figure I. 24.L'absorption d'eau en fonction du temps du MP3[33]

Bourema .M et al**[35]**. Ont étudié l'effet de la PBR dans le mortier de ciment. Les résultats expérimentaux de cette étude, en termes de résistances mécaniques (compression et traction ont montré que à l'état durci la poudre de déchet de brique, joue à la fois un double rôle pouzzolaniques et densification de la matrice cimentaire. Des améliorations dans les performances mécaniques des mortiers ont été constatées à partir de 28 jours d'âge pour des taux de substitution de 5, 10 et 15 % du poids de ciment, comparativement au mortier témoin. Tandis que Les déchets de béton autoplacant mènent à une diminution des résistances mécaniques des mortiers à court et long terme.

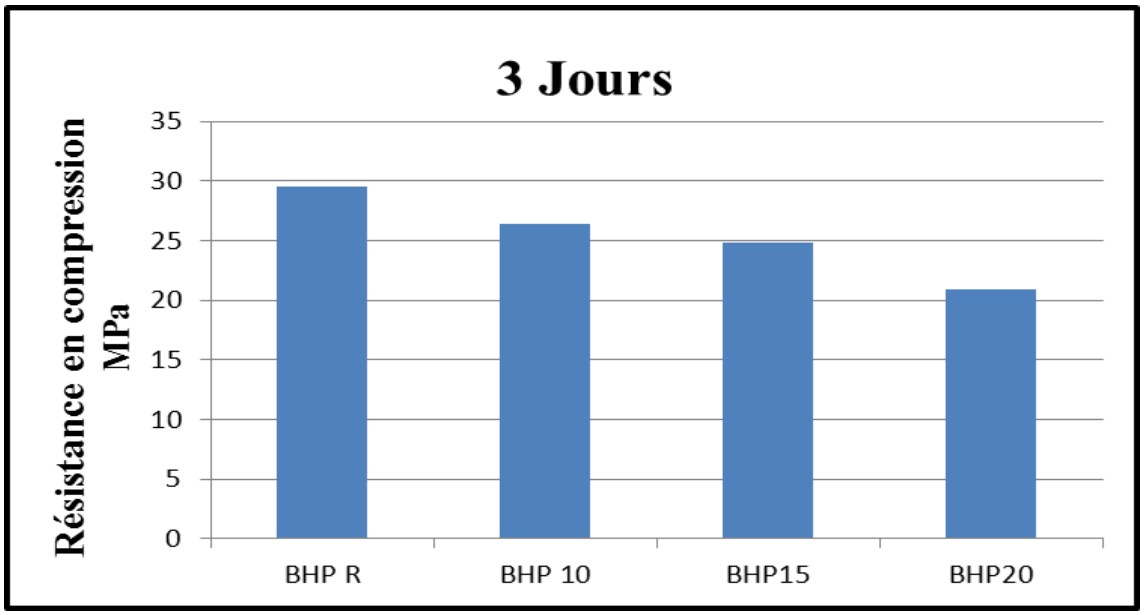


Figure I. 25.Evolution de la résistance en compression à 3 jrs[35]

➢ La même constatation est notée à l'âge 28 jrs, où les résistances diminuent au fur et à mesure de l'augmentation du taux de substitution du ciment par du DBR par rapport à la résistance du BHP(R).

➢ La résistance en compression chute car la poudre de brique présente une faible densité apparente **[36]**et une absorption d'eau plus élevée due à la porosité plus élevée.

➢ A l'âge 28 jrs, les résistances diminuent au fur et à mesure de l'augmentation du taux de substitution du ciment par du DBR par rapport à la résistance du BHP(R).

➢ La résistance en compression chute car la poudre de brique présente une faible densité apparente **[36]**et une absorption d'eau plus élevée due à la porosité plus élevée.

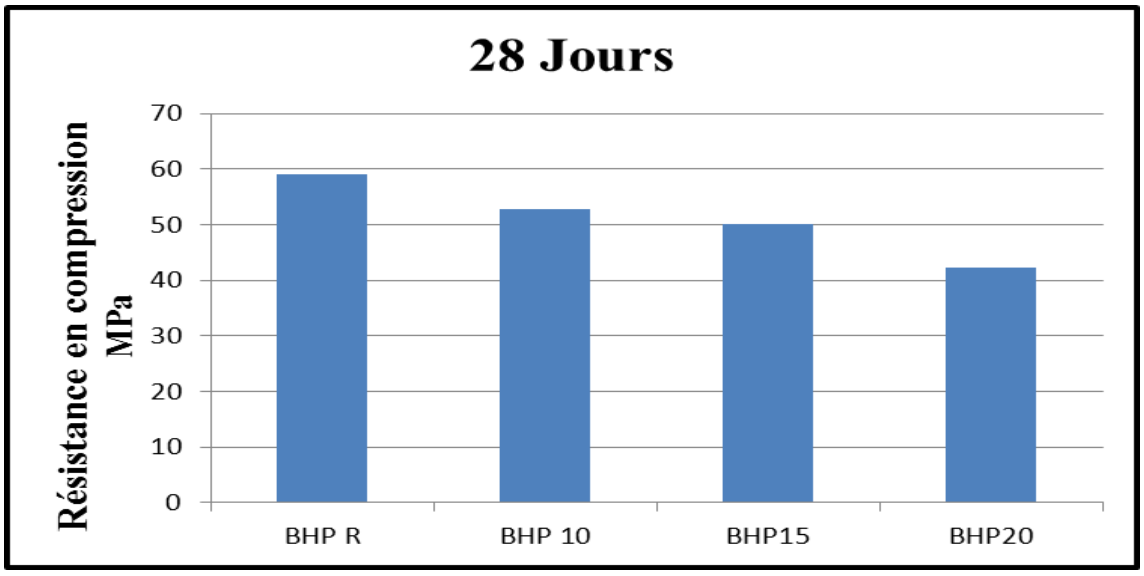


*Figure I. 26. Evolution de la résistance en compression à 28 jrs.**[35]***

➢ Les résistances à la traction par flexion à base du DBR diminuent respectivement entre BHP10, BHP15 et BHP20 de l'ordre de 32%,15% et 45% par rapport au BHP(R) à 3 jrs.

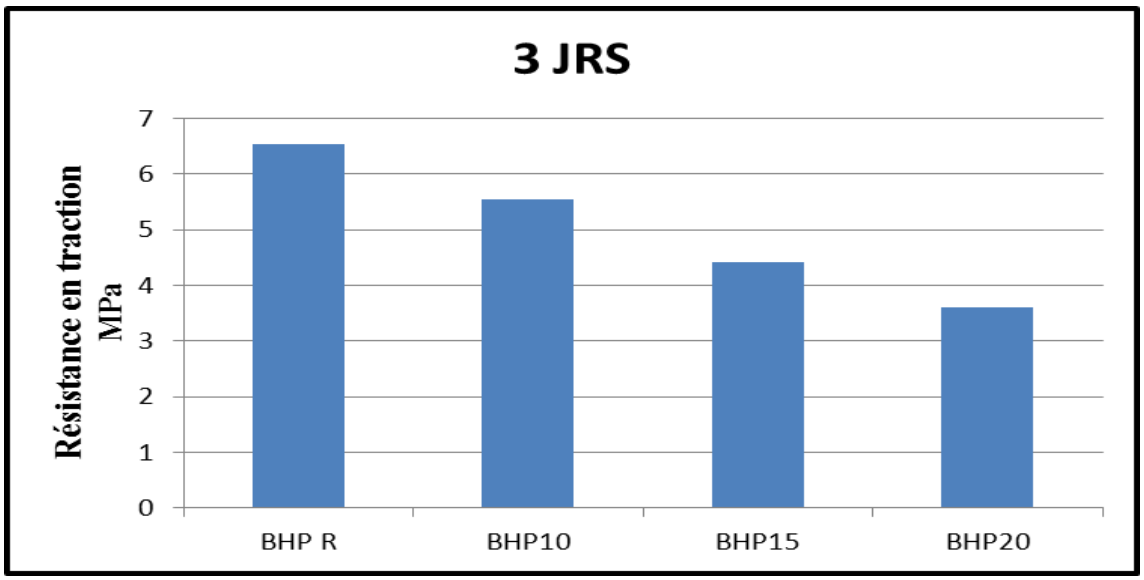


*Figure I. 27.Evolution de la résistance en traction par flexion à 3 jrs**[35]***

➢ La même constatation est notée à l'âge 28 jrs, où les résistances diminuent au fur et à mesure de l'augmentation du taux de substitution du ciment par du DBR. Ces résistances sont de l'ordre de 4%,11% et 13% par rapport à la résistance du BHP(R).

➢ La valeur optimale de la résistance en traction à 3 ou à 28 jours est obtenue par le BHP10 et la valeur minimale est obtenue par le BHP20.

➢ La résistance en traction diminue à cause de la faible liaison entre la poudre de brique broyée et la pâte de ciment, qui pourrait donc influer les performances de résistance à la flexion.

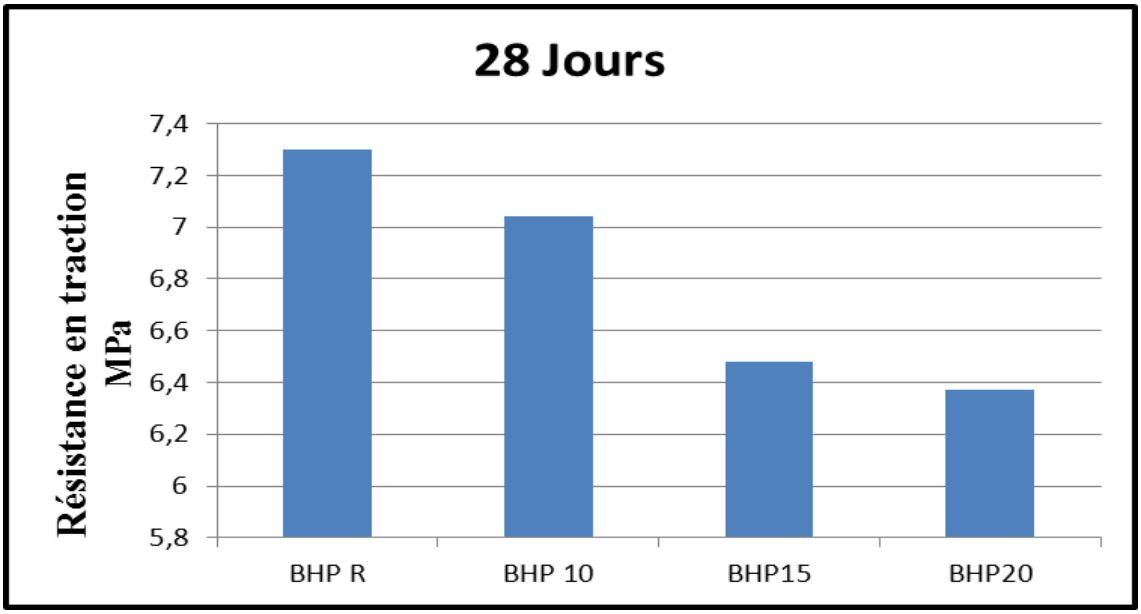


Figure I. 28.Evolution de la résistance en traction par flexion à 28 jrs[35]

Aouni M[37] a remarqué que les déchets de brique influent négativement sur l'ouvrabilité du mortier, et ont remarqué également que plus le pourcentage des déchets augmente, le temps d'écoulement du mortier augment aussi. Cette diminution en ouvrabilité est semblée être due au taux d'absorption élevé des déchets de brique. En plus de la forme irrégulière de ses grains.

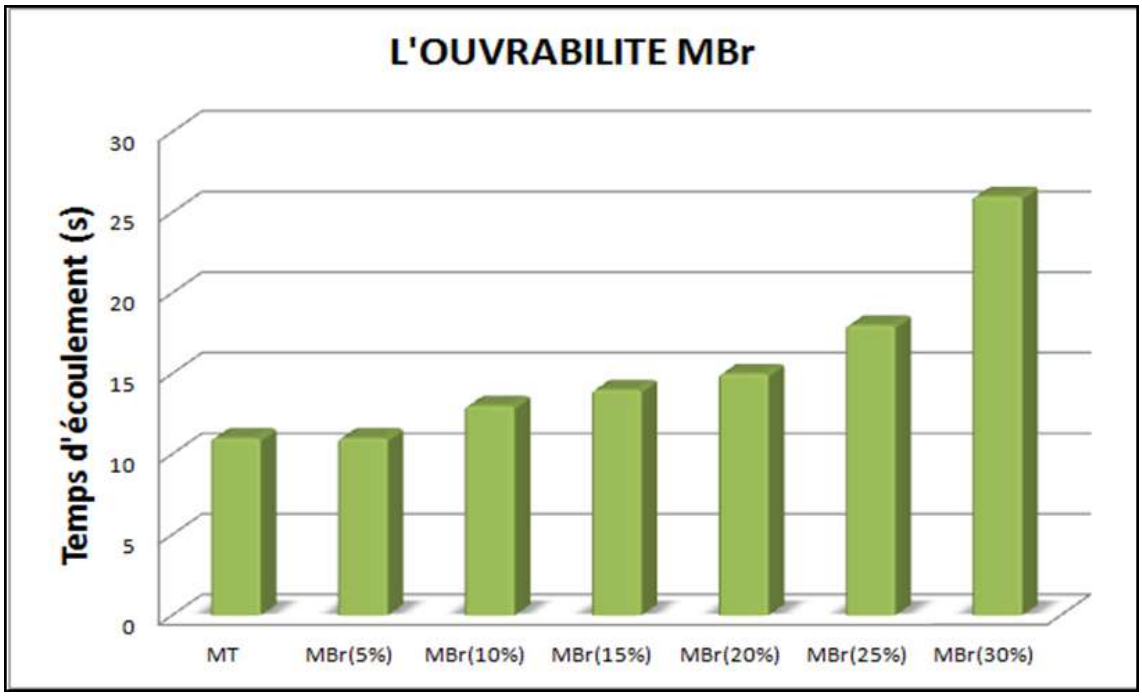


Figure I. 29.Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique (MBr)[37]

Aouni M **[37]** ont remarqué qu'à jeune âge les résistances des mortiers à base de déchet de brique diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en déchet. Cette diminution en ouvrabilité est semblée être due au taux d'absorption élevé des déchets de brique. En plus de la forme irrégulière de ses grains**[38].**

Cette diminution de la maniabilité est due à la demande en eau plus grande du métakaolin. Plusieurs auteurs ont travaillé sur la demande en eau des métakaolins dans des pâtes, mortiers et bétons en concluant toujours que la demande en eau augmentait avec la quantité de métakaolin introduite.**[39, 40]**

Aussi, que les performances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation. Aussi que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute. Ont été constaté aussi que les résistances initiales des différents mortiers (à 3jours) atteignent les 50% par rapport à celle du 28 jours.

[37]A l'âge de 28 jours, ont remarqué que les résistances des mortiers MBr 5%, MBr 10% et MBr 15% dépassent celle du mortier de référence. Ont dit que la pouzzolanicité qui a été déterminante et a donné par conséquent de sensibles progressions de résistance à ces mortiers.

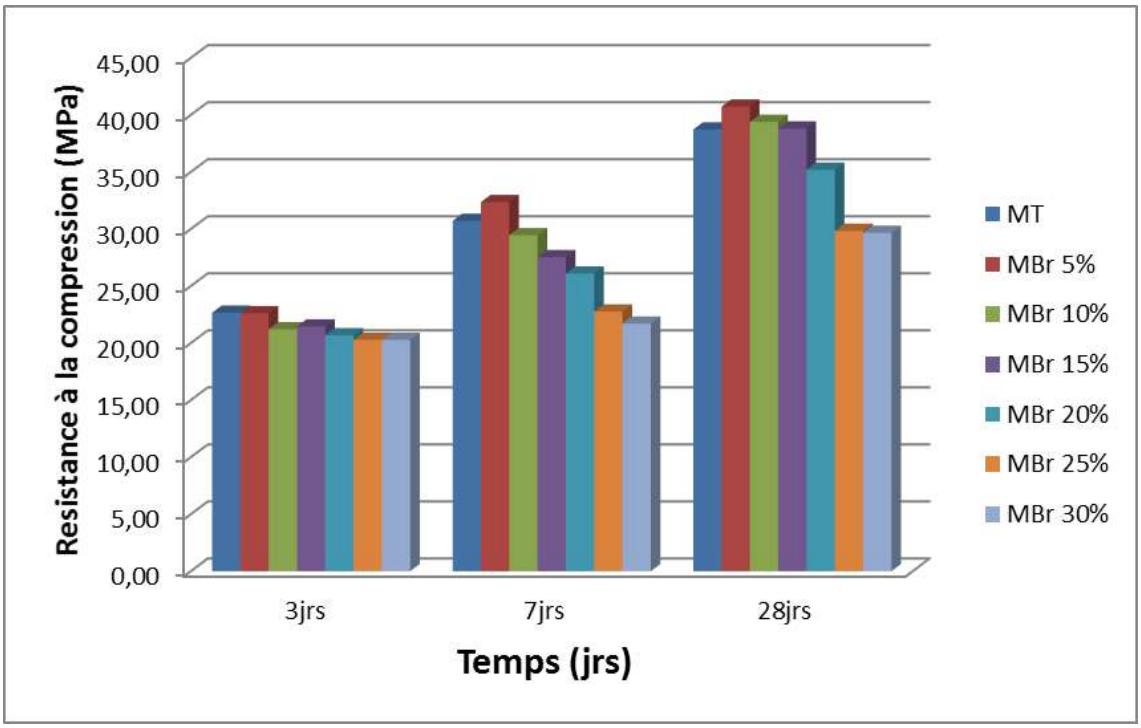


Figure I. 30.Variation de la résistance à la compression des mortiers MBr[37]

[37]A remarqué que les résistances à la traction augmentent en fonction de l'âge quel que soit le type du mortier. Ceci est dû au développement de l'hydratation de ciment en fonction du temps. La meilleure résistance observée correspond au mortier MBr 5%, MBr 10% et MBr 15%, les mortiers présentent une similaire évolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge de ces derniers. Les résistances des mortiers MBr 5%, MBr 10% et MBr 15% dépassent celle du mortier témoin pour les trois âgés et il est de l'ordre de 7,51 MPa, 7.21 MPa et 7,23 MPa respectivement à 28 jours, et la plus faible valeur de l'ordre de 3.30 MPa est remarquée pour le mortier MBr 30%

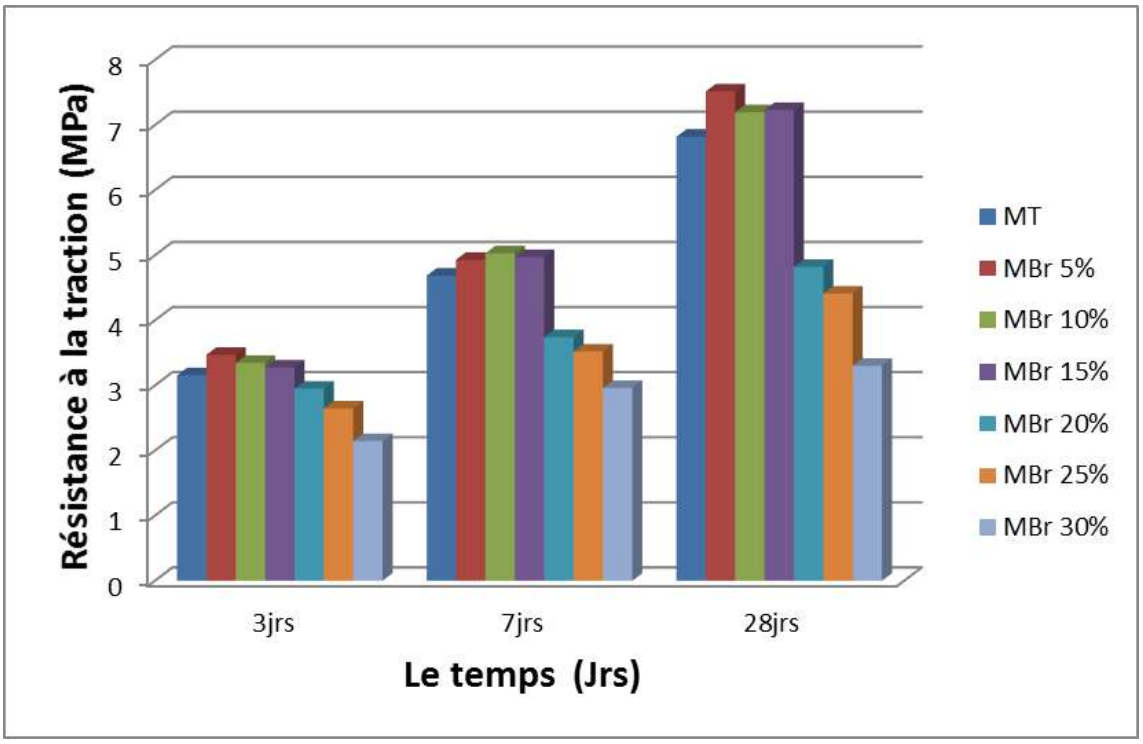


Figure I. 31.Variation de l résistance à la traction par flexion des mortiers MBr[37]

[37**]**Montre que le mortier à base des déchets de brique absorbe moins d'eau par rapport au mortier témoin. Ceci peut être dû aux réactions pouzzolaniques des déchets de brique qui ont permettaient l'amélioration de la compacité de ces mortiers.

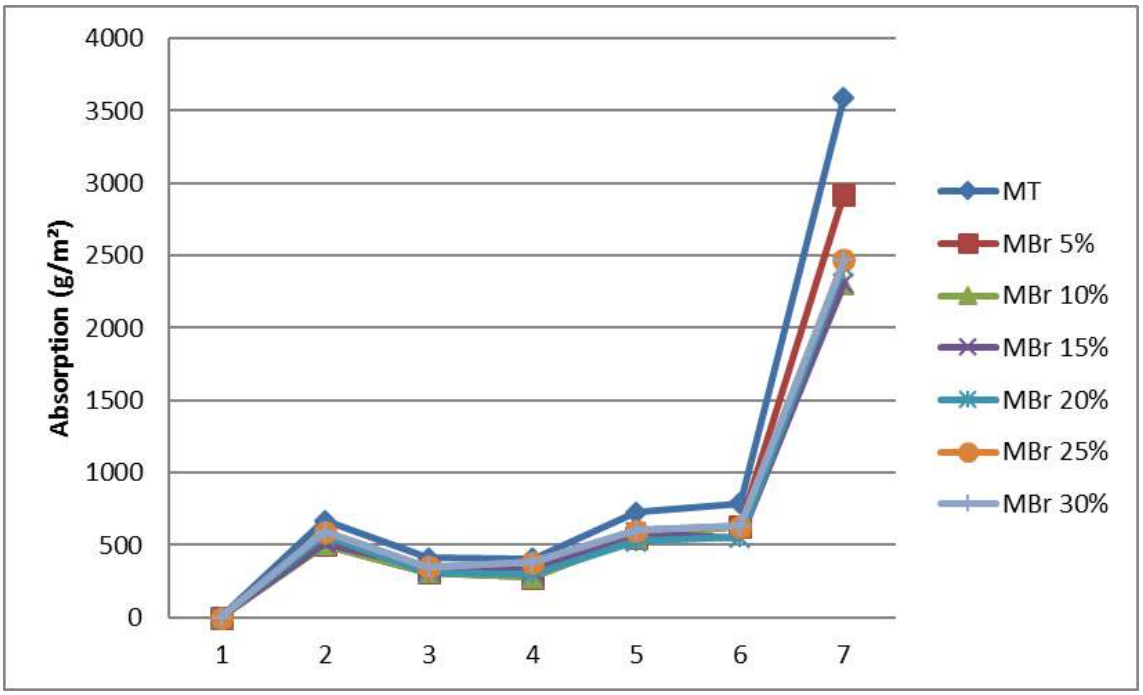


Figure I. 32.Absorption capillaire du mortier à base de déchets de brique[37]

I.5.8.2. Déchet de brique sous forme de granulats

Ouzadid.S s et al**[33]** ont constaté que la variation de la résistance suit la même cinétique aux différents âges, a été enregistré un optimum de résistance pour le mélange qui contient 25% de substitution de sable recyclée SBR avec une amélioration atteint 13% à jeune âge et environ 17% à long terme suit a une diminution de la résistance avec l'augmentation de pourcentage de substitution de SBR. **[33]**Les résultats obtenue sont tous meilleure que celle de mortier témoin donc ont dit que le SBR améliore la résistance à la compression d'une façon positif. **[33]**la même cinétique a été enregistrée sur la variation de la résistance à la traction, des améliorations à l'ordre de 20% à jeune âge et de 22% à long terme té une diminution après l'augmentation de pourcentage de substitution de SBR qui atteint les 13%. Ont remarqué que le mortier à base de sable de brique recyclé (SBR) absorbe plus d'eau légèrement par rapport au mortier témoin. La quantité d'eau absorbée par le mortier augmenté avec l'augmentation de l'ajout de SBR **[33]**

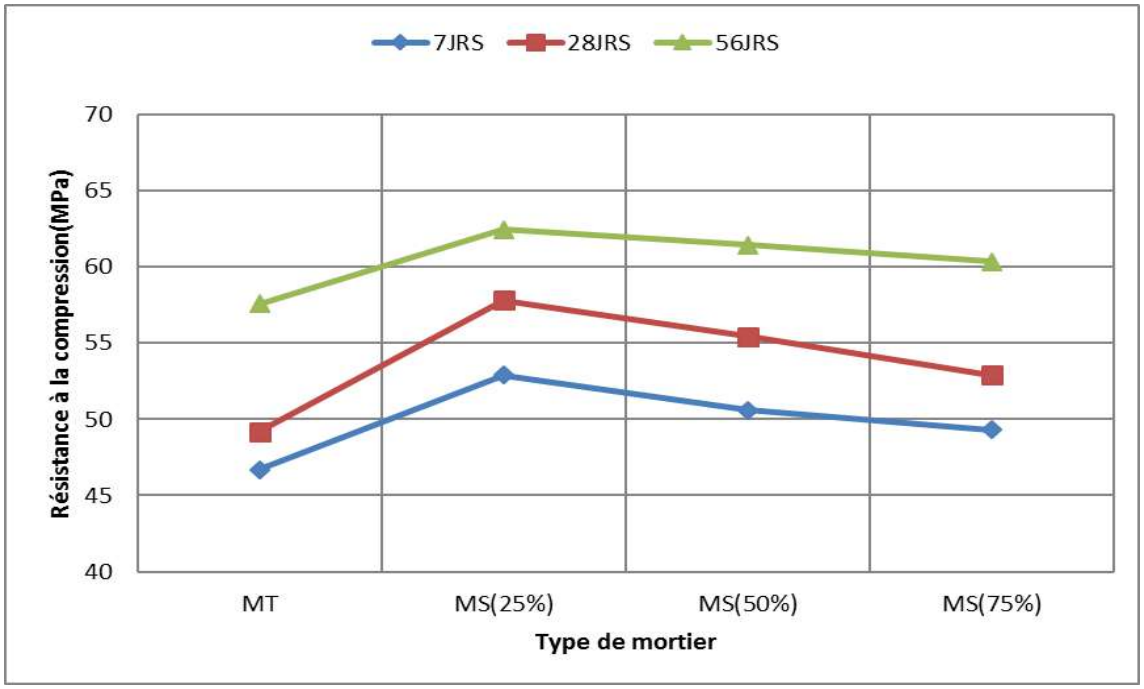


*Figure I. 33.La résistance à la compression en fonction de pourcentage de SBR**[33]***

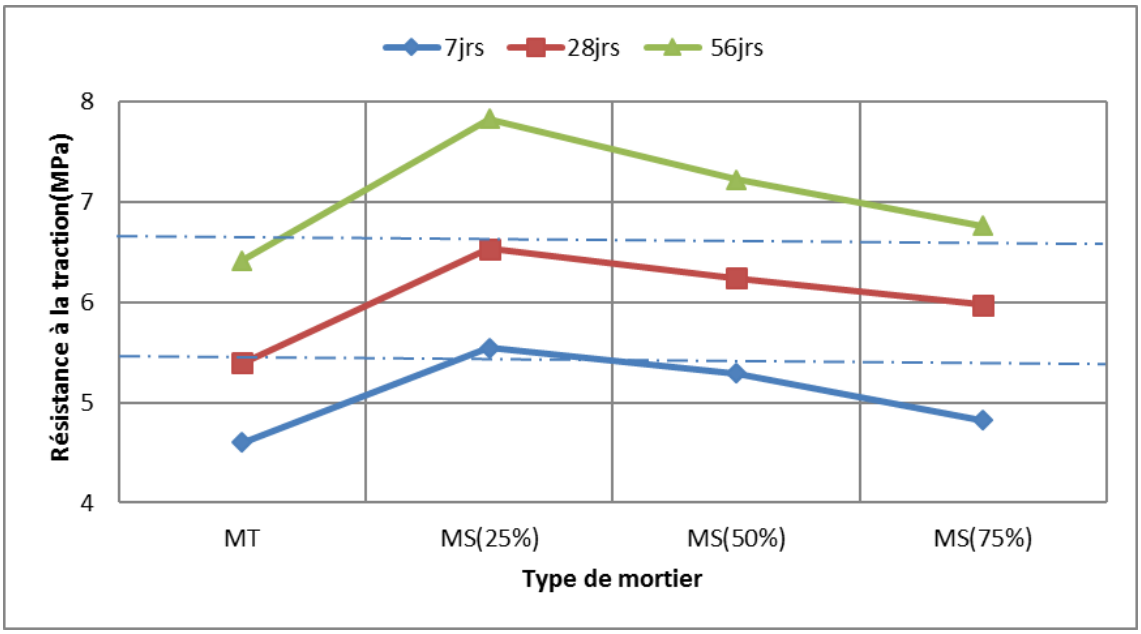


Figure I. 34.La résistance à la traction en fonction de pourcentage de SBR[33]

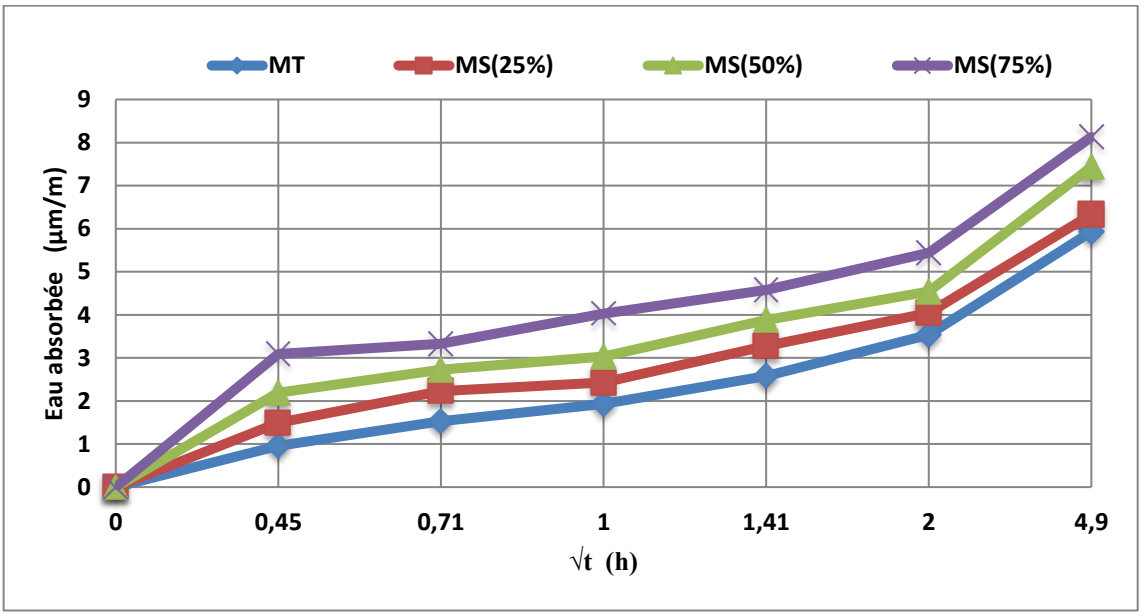


Figure I. 35.L'absorption d'eau en fonction du temps du MS[33]

Debieb F. et al. **[41]**, ont étudié la possibilité d'utilisation des déchets de brique dans la fabrication d'un béton ordinaire avec des taux de remplacement de 25, 50, 75 et 100% des granulats naturelles (fin et grossier). L'introduction des granulats de déchet de brique a été faite une fois, par le remplacement partiel du sable naturel seulement. La deuxième fois par le remplacement du gravier seulement. Et en dernier par le remplacement des deux granulats à la fois. Les résultats de cette étude montrent qu'un remplacement maximal de 25 % pour le sable et de 50% pour le gravier avec le déchet de brique, mènent à des caractéristiques similaires à celles du béton à base de granulats naturelles en termes de résistances mécaniques (compression et flexion), retrait, absorption capillaire, porosité et perméabilité à l'eau.

Lan Z. et al.[42], ont utilisé des déchets de brique provient d'un site de construction et ont une résistance à la compression plus de 10 MPa. Ces déchets sont introduits dans la fabrication d'un béton à base de 15% de cendre volante, avec des taux de remplacement de 0, 30, 40 et 50% des granulats concassées. Les résultats de cette étude ont montré que les granulats recyclés (déchets de brique) ont une porosité très élevée par rapport aux granulats concassés. Et que les résistances mécaniques du béton sont diminuées avec l'augmentation du dosage en granulats recyclés.

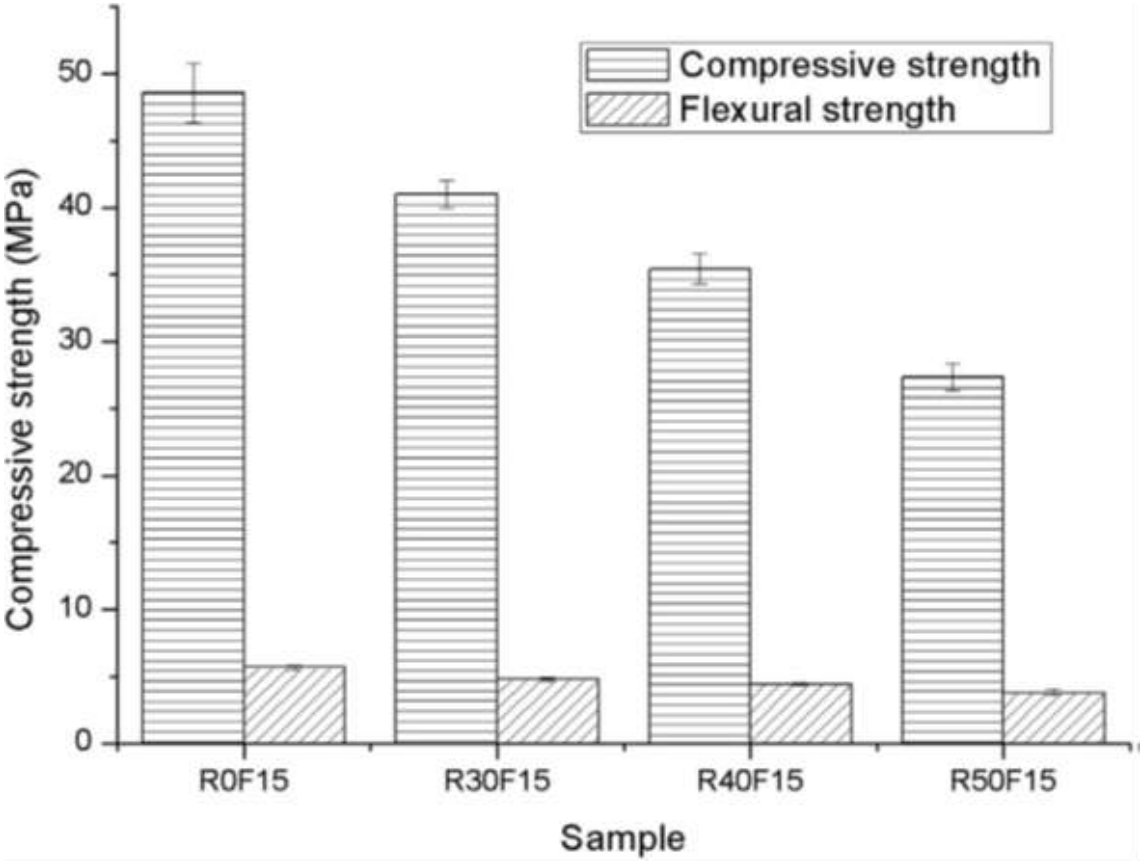


Figure I. 36.La variation de la résistance du béton avec et sans granulats recyclés[42]

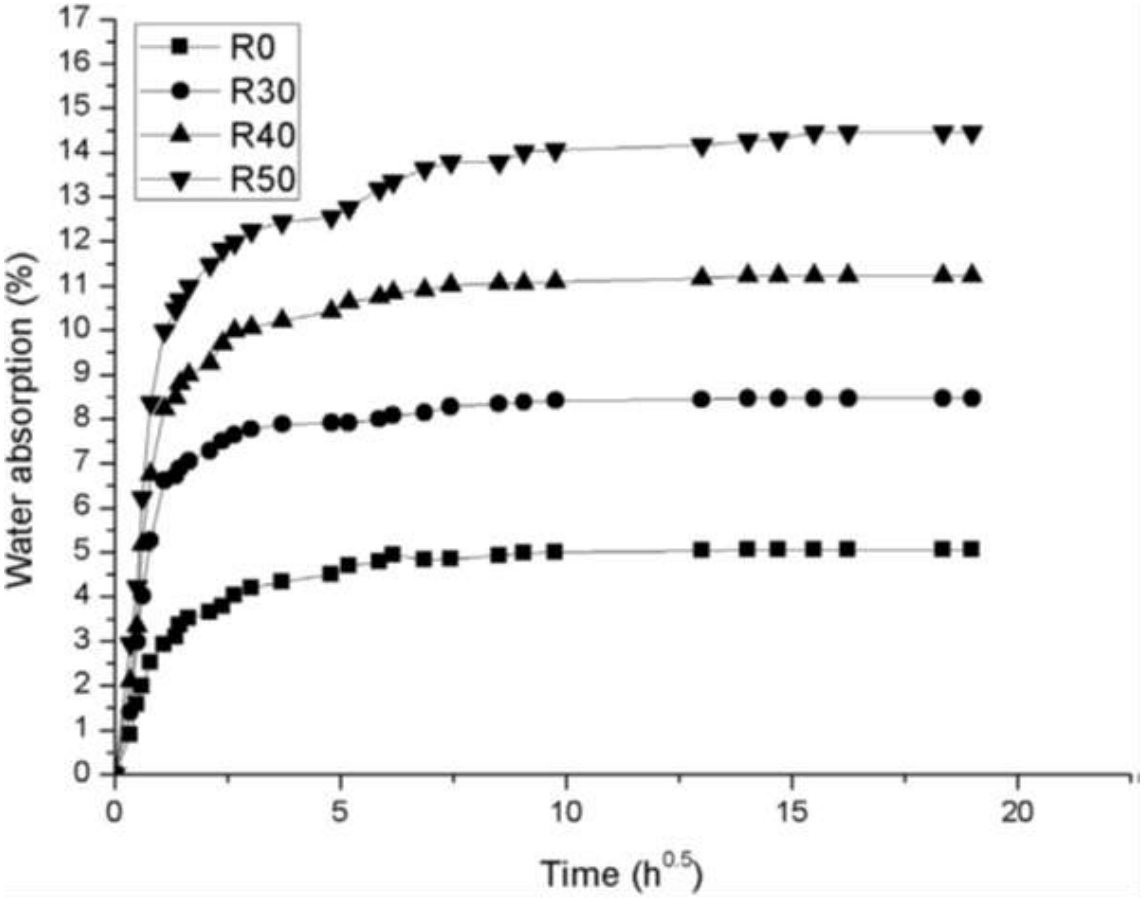


Figure I. 37.Absorption d'eau du béton avec et sans granulats recyclés[42]

I.6. Effet d'activateurs chimiques

La présence d'activateurs fortement alcalins est indispensable pour que la réaction de géo polymérisation ait lieu. Les activateurs alcalins ont pour fonction d'accélérer la dissolution de la source d'aluminosilicate favorisant la formation d'hydrates stables à faible solubilité et la formation d'une structure compacte avec ces hydrates. Les propriétés physiques et chimiques des activateurs jouent un rôle important dans le comportement du matériau activé**[43]**.

Les activateurs généralement utilisés sont des hydroxydes ou des sels alcalins, dont les plus utilisés, et économiquement avantageux sont le NaOH, le Na2CO3, Na2OnSiO2 et le Na2SO4. Certains composants du potassium (KOH, K2OnSiO2…) ont été utilisés dans certaines études de laboratoire. Cependant, leur application au niveau industriel est très limitée, en raison de la disponibilité et des coûts**[43]**.

I.6.1. Types d'activateurs alcalins

I.6.1.1. Hydroxyde de sodium

L'hydroxyde de sodium ou soude caustique, est l'un des composés les plus utilisés dans l'industrie chimique avec l'acide sulfurique et la soude commerciale. Il y a difficilement un composé chimique simple qui ne nécessite pas un ou plusieurs de ces trois composés chimiques pour sa production [C. J. Shi et al., 2006]. La soude caustique est produite par l'électrolyse d'une saumure (eau saturée en sel). Ce procédé est responsable du dégagement de la majeure partie de l'énergie (95%) nécessaire pour la production de la soude. Cette base forte est

communément utilisée pour activer les matériaux qui permettent de former les géopolymères.**[43]**

Du point de vue environnemental, la production de NaOH contribue aussi au réchauffement climatique. Selon P. Duxson et al **[44]** , une tonne de NaOH produite, émet environ une tonne de CO2. Quant à [Turner et Collins, 2013], ils estiment à 1,9 tonne la quantité de CO2émis par une tonne de NaOH produite. Cependant, en raison de la très faible quantité de NaOH nécessaire pour activer les matériaux, son impact environnemental est négligeable par rapport à la quantité de ciment nécessaire pour élaborer des bétons à base de ciment Portland ordinaire. Dans la Figure 0.I on montre les étapes du cycle de vie pour la production de NaOH.**[44]**



*Figure I. 38.Étapes du cycle de vie considérées pour la production de NaOH**[45]**.*

L'hydroxyde de sodium anhydre a une densité de 2,13 g/cm à 20°C et un point de fusion de318°C. Il est très soluble dans l'eau avec une solubilité de 1090 g/l à 20°C.

La dissolution de NaOH dégage une grande quantité de chaleur avec une augmentation de la température jusqu'à atteindre une température proche de celle du point d'ébullition de l'eau, soit 100°C, risquant ainsi de provoquer des éclaboussures dangereuses. C'est un produit qui doit donc être manipulé avec beaucoup de précautions (gants, lunettes de protection, blouse, etc.). L'hydroxyde de sodium est largement utilisé dans l'industrie comme base pour la fabrication de papier, de savon et détergents, de produits chimiques **[45]**.

Des études réalisées par Babaali.N**[46]** et al. Ont montré que le ciment hydraté peut être réactivés par broyage à 3400cm2 / g. De plus, l'utilisation du NaOH avec faible pourcentage peut aussi améliorer la prise des ciments. Ont Montré dans la figure 3.4.e.que les résultats de la compression des mortiers CS, C600, C800 et C 1000 respectivement calcinées pendant 2 heures, et 3heurs avec l'ajout de l'activateur chimique avec des pourcentages de 6 et 8%. Ont constaté que l'évolution de la résistance suit la même cinétique pour toutes les familles confectionnées, plus l'augmentation de pourcentage du NaOH, la résistance diminue. De plus il existe des résultats similaires au mortier témoin tel que CS0% et C800-3h-0%. Dans d'autres cas il existe des résultats supérieurs au mortier témoin à savoir C600-2h-0%, C800-3h-0% et C1000-1h-0% où a été enregistrés des améliorations de la résistance de 49%, 42% et de 15 % respectivement. Les ciments traités mécaniquement par broyage, montrent une augmentation de la résistance à la compression après 28 jours, développant un processus plus rapide d'hydratation et un temps de prise plus court. Une réduction de la taille moyenne des particules entraîne généralement une augmentation du taux d'hydratation.

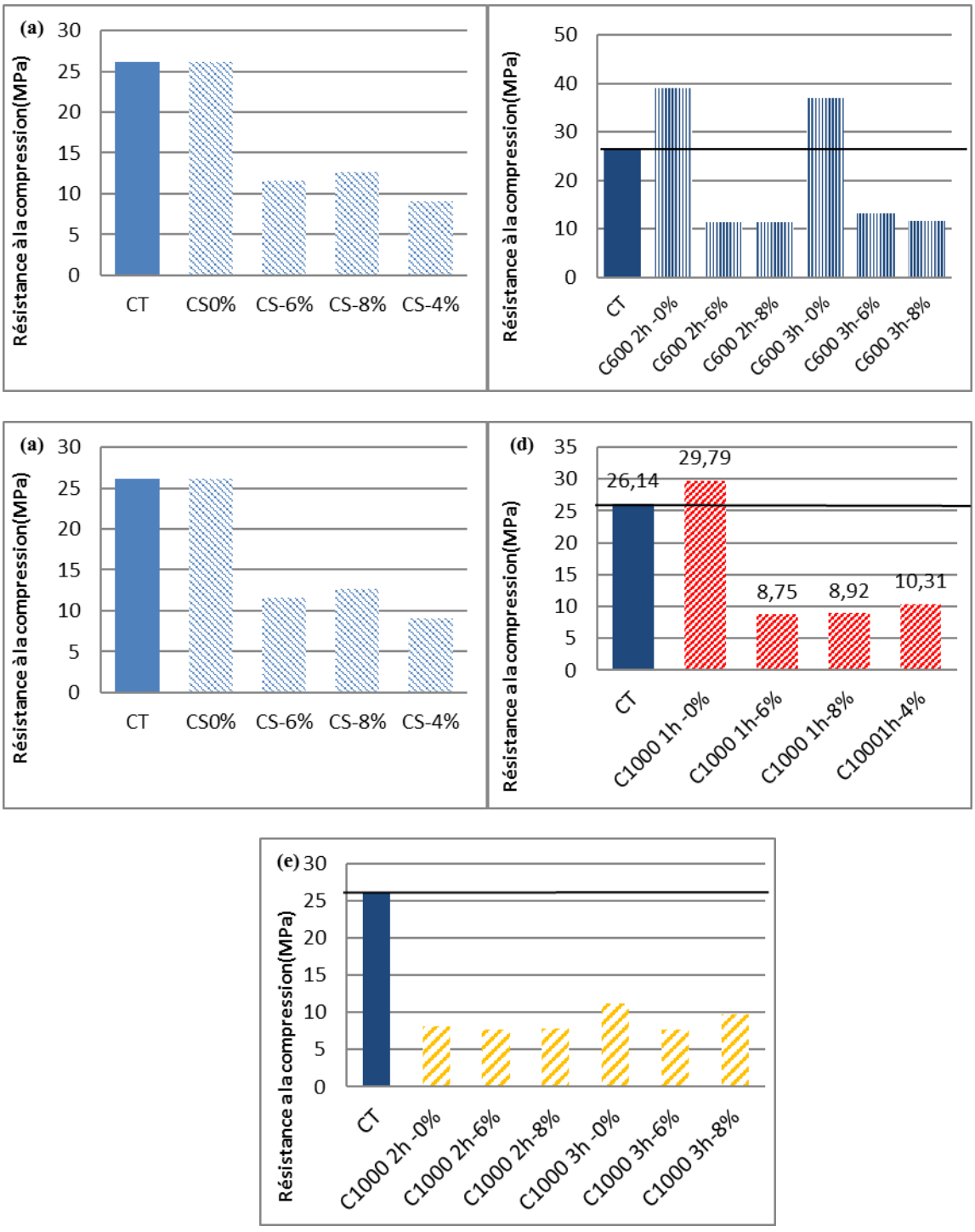
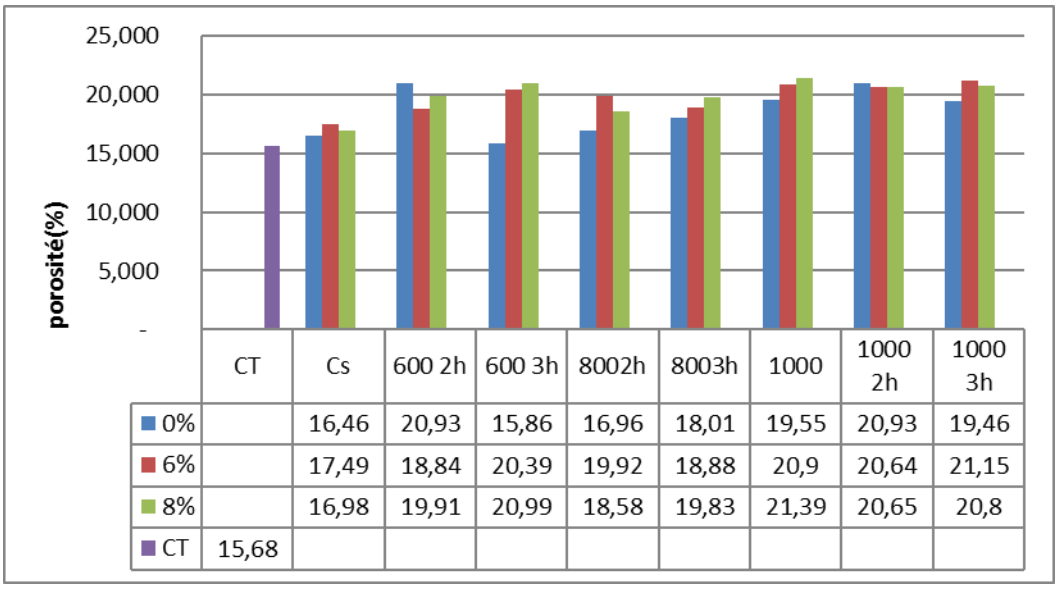


Figure I. 39.Résistance à la compression des mortiers traités en fonction du pourcentage du NaOH[46]

Les résultats de la porosité accessible obtenues par Babaali.N[46], et al pour tous les mélanges en fonction de la température de calcination et pourcentage de NaOH, sont présentés à la Figure 0.II suivante.



	CT	Cs	600 2h	600 3h	8002h	8003h	1000	1000 2h	1000 3h
0%		16,46	20,93	15,86	16,96	18,01	19,55	20,93	19,46
6%		17,49	18,84	20,39	19,92	18,88	20,9	20,64	21,15
8%		16,98	19,91	20,99	18,58	19,83	21,39	20,65	20,8
CT	15,68								

Figure I. 40.Porosité accessible à l'eau des différents mortiers en fonction de la température de calcination et % de NaOH ***[46]***

Dans les conditions standard, a été comparée les différents mélanges, ont observé que les mélanges les plus poreux sont 600 2h 600, 3h, 1000 ,1000 2h, 1000 3h avec 6%,8% de NaOH.**[46]** ont bien montré l'effet bénéfique de l'ajout de NaOH de défirent température ce qui concerne l'effet du traitement thermique SN sur la porosité des différents mélanges, la figure 3.8 montre que les valeurs de la porosité les plus élevées pour tous les mélanges, sont enregistrées dans le cas de 600°2h -0% et 1000 2h-0%.**[46]**

Ont remarqué que le mortier de (CT) présente la moindre valeur de la porosité Par rapport les autres mélanges. ,ont remarqué qu'il y'a une variation inversement proportionnelle entre ces deux paramètres (de la résistance mécanique avec de la porosité) ; La masse d'eau absorbée par unité de surface a été tracée en fonction de la racine carrée du temps, les résultats de l'essai d'absorption d'eau des différents mélanges réalisés sont représentés dans les figures 3.7, Suivantes.**[46]**

Les figures 3.7.a jusqu'au 3.7.e, représente les résultats de l'absorption d'eau par capillarité des mortiers CS, C600, C800 et C 1000 respectivement calcinées pendant 2 heures, et 3heurs ajoutant de l'activant chimique avec des pourcentages de 6 et 8%.ont constaté que pour les tous les mélanges calcinés pendant 2h et 3h avec différents pourcentages du NaOH, présentent un taux d'absorption plus élevé que celui du mortier témoin (CT). En présence de l'eau il y'a formation d'un sel expansif inactif (Na-CH), permettant de laisser plus de vide à l'intérieur de la matrice cimentaire, après durcissement et séchage des éprouvettes à l'absorption capillaire des mortiers augmente. Cette augmentation est estimée de 53% jusqu'au 80% pour les mortiers CS. En ce qui concerne les mortiers C600, C800 et C a enregistré des agnations. **[46]**

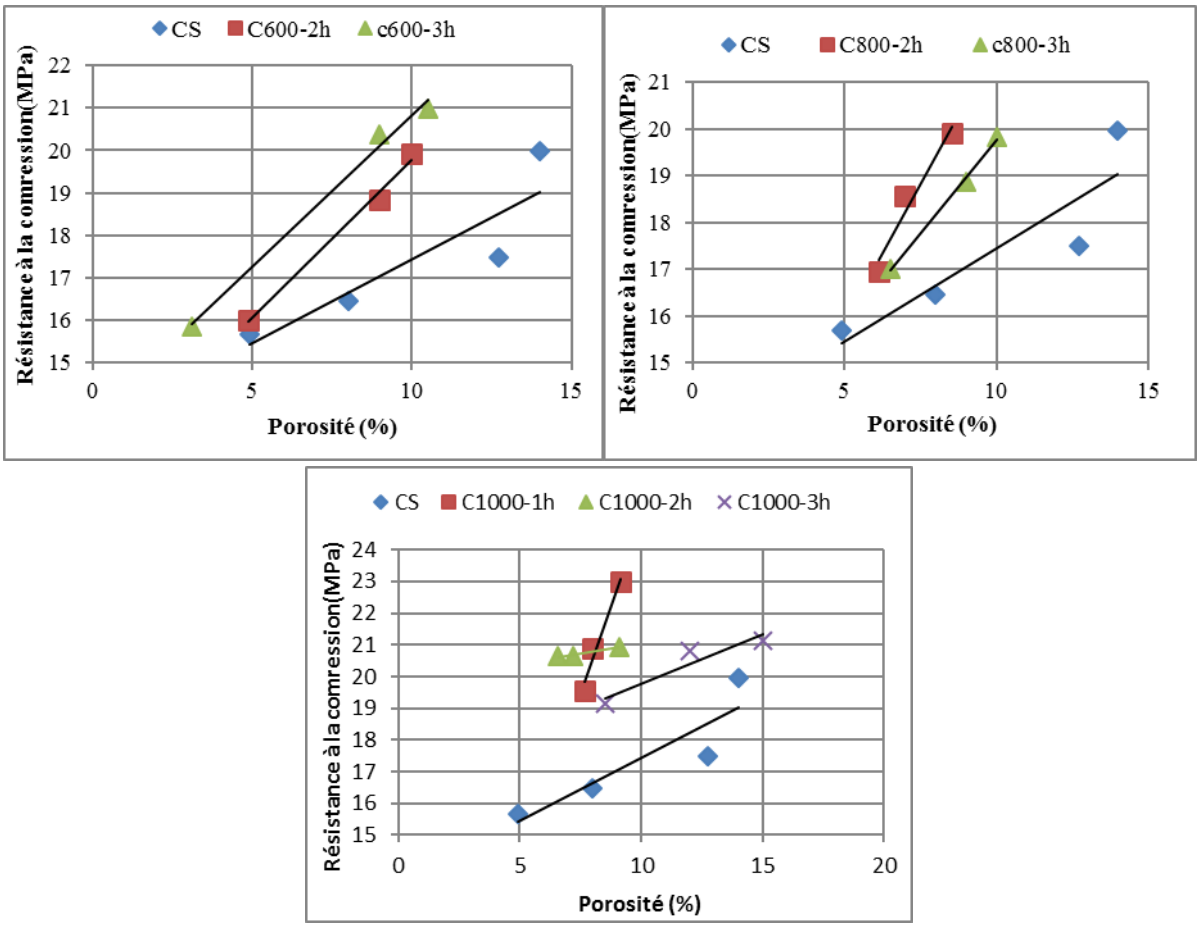


Figure I. 41.Corrélation entre la résistance et la porosité des déférents types des mortiers[46]

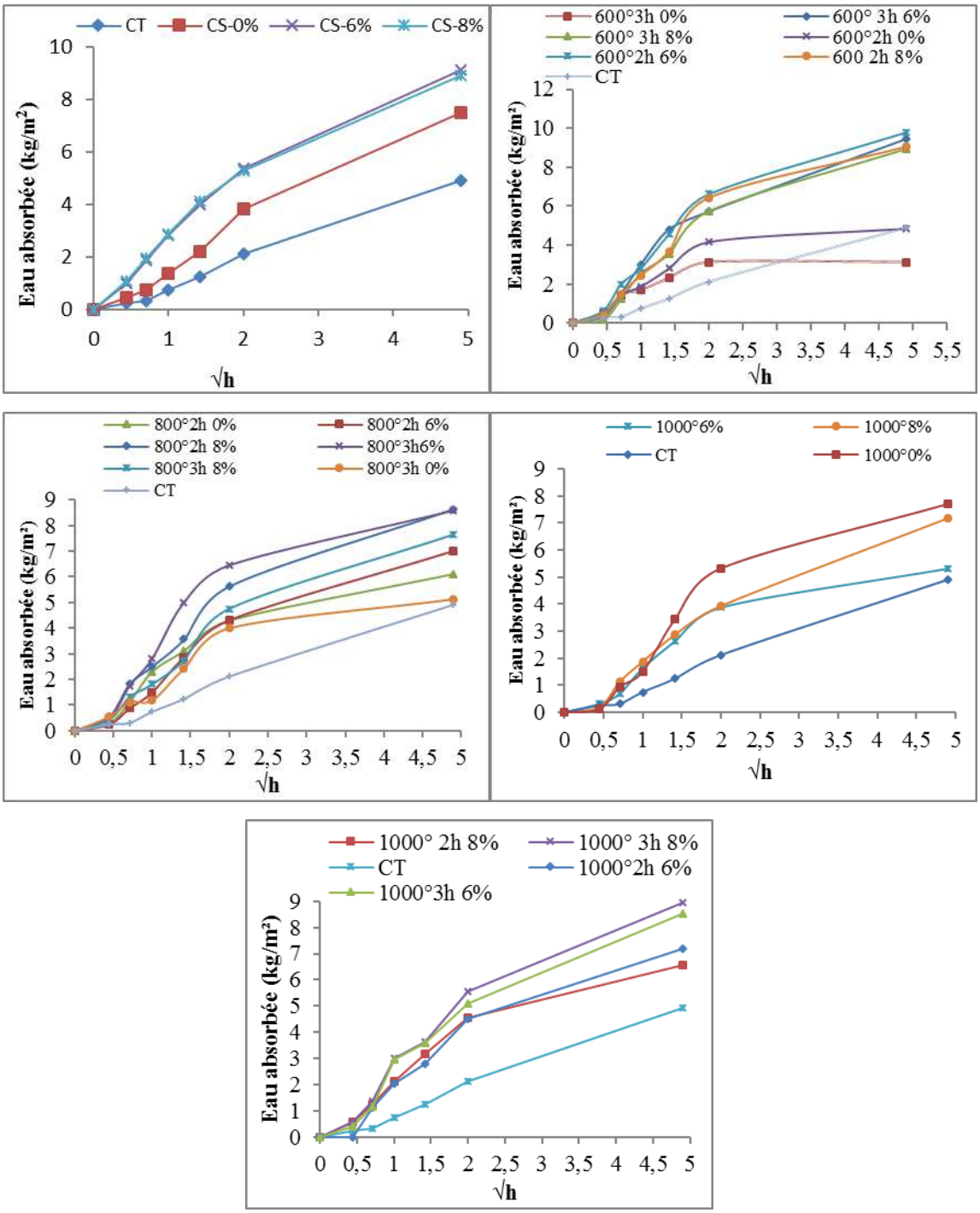


Figure I. 42.Absorption d'eau par capillarité des mortiers[46]

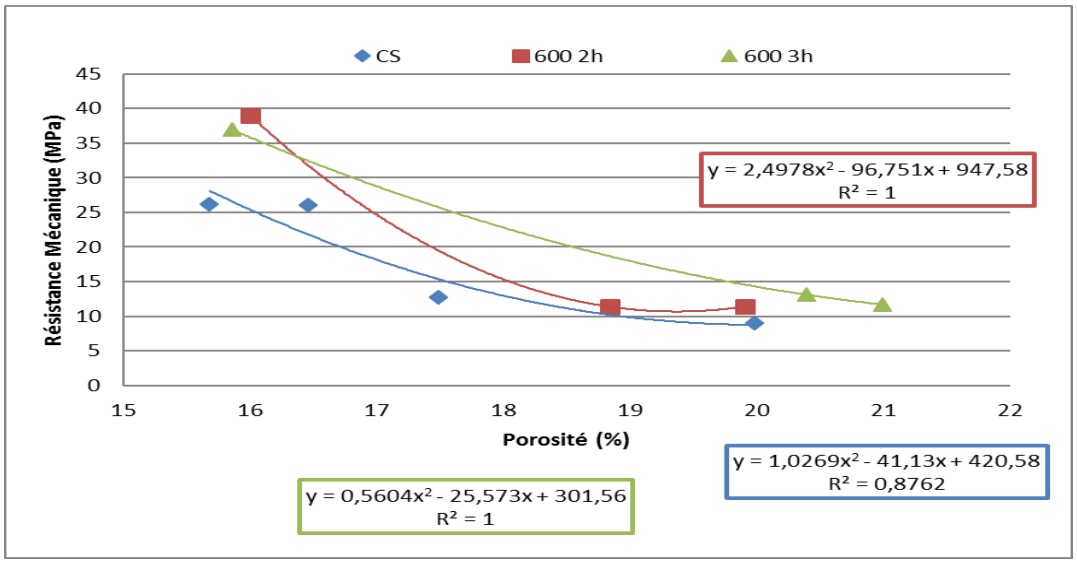


Figure I. 43.Relation entre l'absorption d'eau et de la porosité Calciné à 600°C[46]

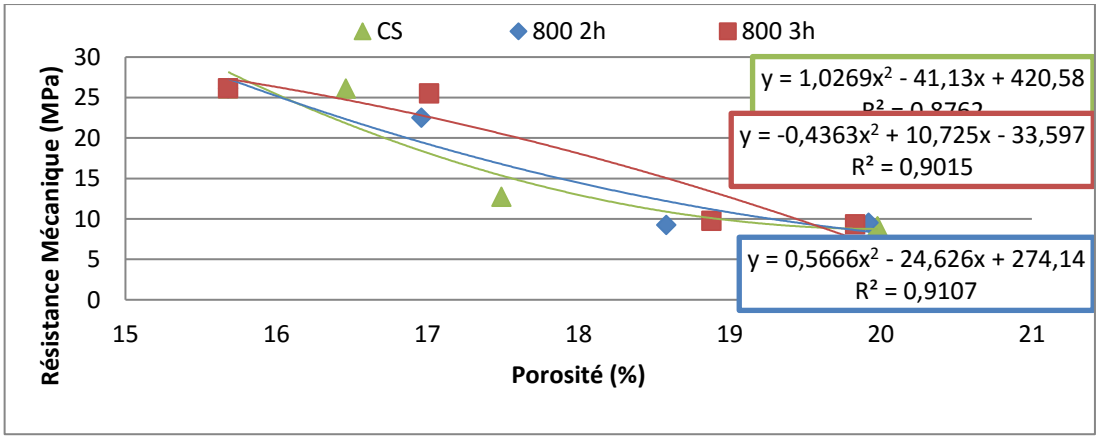


Figure I. 44. Relation entre l'absorption d'eau et de la porosité Calciné à 800°C.[46]

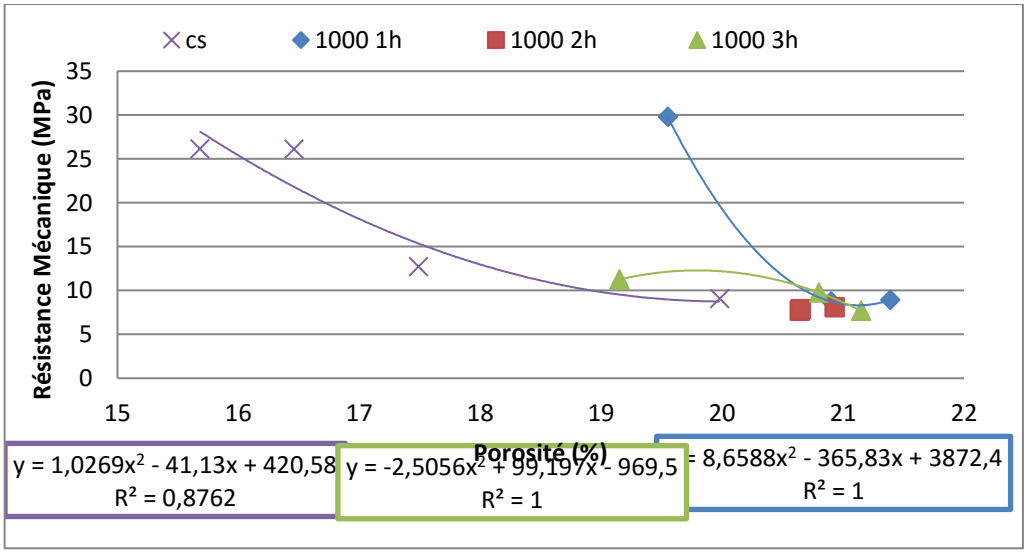


Figure I. 45.Relation entre l'absorption d'eau et de la porosité Calciné à 800°C[46]

I.6.1.2. Carbonate de sodium

Le carbonate de sodium est un composé chimique ayant pour formule Na2CO3. Il s'agit d'un sel de sodium de l'acide carbonique. Il peut être sous forme de poudre blanche anhydride avec environ 99% de carbonate de sodium (Na2CO3). Le carbonate de sodium peut être obtenu à partir de sources naturelles ou selon le procédé industriel Solvay (pour environ 74% de la production mondiale) à partir de chlorure de sodium et de craie (calcaire). Il peut, en effet, être obtenu à partir de gisements de natron ou dans les cendres d'algues ou de plantes et peut également être synthétisé en chauffant du bicarbonate de sodium à une température de 100°C. Il a une densité de 2,5 g/cm et sa solubilité dans l'eau est de 300 g/l à 20°C. Le carbonate de sodium peut aussi être sous forme hydraté : (1) le carbonate de sodium monohydrate (Na2CO3·H2O), (2) le carbonate de sodium heptahydrate (Na2CO3·7H2O) et le (3) carbonate de sodium décahydrate (Na2CO3·10H2O). La formation de chaque hydrate dépend de la concentration de la solution du carbonate de sodium et de la température. La solubilité augmente lorsque la température augmente jusqu'à 35,4 °C, puis diminue graduellement.

Lorsque les carbonates de sodium anhydride et hydraté sont dissouts dans l'eau, ils ont des propriétés thermiques différentes. Le carbonate de sodium anhydride et le carbonate de sodium monohydrate dégagent de la chaleur tandis que le carbonate de sodium heptahydrate et le décahydrate absorbe de la chaleur **[45]**.

Le carbonate de sodium est utilisé dans plusieurs domaines d'application, notamment dans la fabrication du verre, d'émail pour la céramique, pour la fabrication de détergents… En raison de ses propriétés basiques, il est aussi utilisé pour l'activation alcaline du laitier**[47, 48]**. Cependant, son utilisation comme activateur de cendres volantes est moins efficace. **[49]**

I.6.1.3. Silicate de sodium

Le silicate de sodium se présente sous une forme solide ou liquide. La forme la plus utilisée pour l'activation alcaline est la forme liquide (solution de silicate de sodium). Elle est obtenue par dissolution sous pression à des températures de 140-160°C de silicates de sodium cristallins fabriqués à haute température (≈1400°C) à partir de carbonate ou de sulfate de sodium et de sable de silice. Elle peut être aussi préparée par attaque à chaud de produits siliceux par de la soude concentrée. Les étapes du cycle de vie considérée pour la production de silicate de sodium sont montrées dans la Figure 0.III.

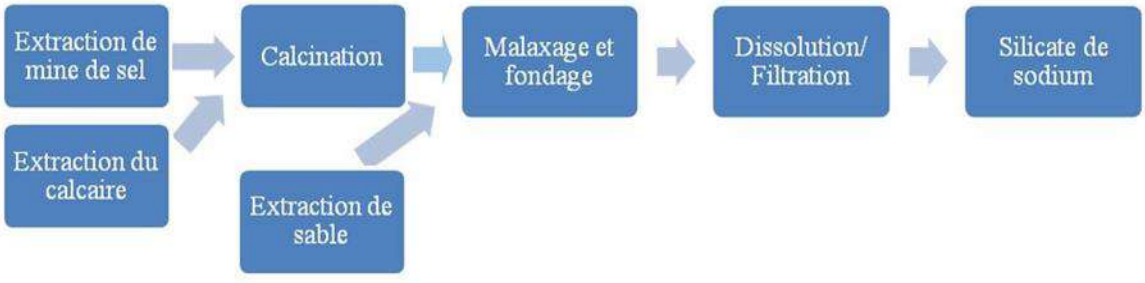


Figure I. 46.Étapes du cycle de vie considérées pour la production de silicate de NaOH[45]

Les solutions de silicate de sodium sont caractérisées par le rapport molaire SiO2/Na2O souvent noté n. Leur domaine d'application dépend fortement de la valeur de n qui peut varier

de 0,25 à 2,5 pour les solutions commerciales**[49]**. La viscosité de la solution est d'autant plus élevée que le rapport molaire SiO2/Na2O augmente. C'est un composé qui intervient dans divers domaines, notamment dans l'industrie du ciment, dans les réfractaires, dans l'industrie textile, etc.

Les différentes études menées jusqu'à présent sur l'activation alcaline des matériaux ont montré que les solutions de silicate alcalin de faible rapport SiO2/Na2O sont les activateurs les plus efficaces pour l'obtention de géopolymères de meilleures performances mécaniques. Cela n'est possible qu'en ajoutant du NaOH à la solution commerciale afin d'augmenter le pH de la solution et rendre plus réactive les espèces silicatées qui jouent un rôle important dans la formation du gel géo polymérique. Comme tout composé basique et en raison de son caractère corrosif, la manipulation de la solution de silicate de sodium doit se faire en prenant des précautions.

I.7. Matériaux précurseurs solides

En général, tout matériau aluminosilicate possédant une phase réactive peut être activé entrant une large gamme de matériaux susceptibles d'être activés, dont les sous-produits industriels et les cendres volcaniques (pouzzolanes artificielles), les argiles calcinées ou non calcinées et les pouzzolanes naturelles**[49]**.

I.7.1. Le métakaolin

Le métakaolin, matériau naturel riche en silice et en alumine, est obtenu à partir de la calcination (autour de 700°C) du kaolin brut qui contient de la kaolinite comme minéral principal. C'est un matériau amorphe métastable avec une grande réactivité. Sa réaction avec des solutions alcalines entraine la formation d'un géopolymère avec des performances mécaniques élevées.

L'activation alcaline du métakaolin est basée sur la rupture des liaisons covalentes Si-OSi, SiO-Alet Al-O-Al due à la concentration élevée d'ions OH- dans le milieu conduisant au passage en solution des ions aluminates et des silicates formant des groupements SiOH et Al-OH. La condensation de ces espèces chimiques entraine la formation d'un gel d'aluminosilicate amorphe aux DRX couramment nommé NASH (Na2O-Al2O3-SiO2H2O).

De nombreuses études portant sur l'activation alcaline du métakaolin avec différents activateurs ont été réalisées**[50]**. Selon Alonzo et al. Les caractéristiques physicochimiques des géopolymères à base de métakaolin dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la teneur en silice dissoute, la température de maturation, la nature et la concentration de l'activateur, la composition chimique et minéralogique du métakaolin.

I.7.2. Influence de la teneur en silice

Monzó et al **[51]** ont déterminé l'effet de la quantité de silice soluble dans la solution d'activation (rapport molaire SiO2/Na2O égal à 0,19 et 0,69, MK-DNW1 et MK-DNW2) à différentes températures de maturation (85°C (C1), 150°C (C2) et 200°C (C3)) sur les caractéristiques physico-mécaniques et minéralogiques et sur la microstructure des produits formés par activation alcaline du métakaolin [51]. Le métakaolin a été activé avec NaOH (MKDN) et avec silicate de sodium MK-DNW1etMK-DNW2.LaFigure1. 10Montre les

résultats de la résistance mécanique à la compression du matériau géopolymères (à24heures). Dans tous les cas, il est à note que, quelle que soit la température de durcissement, la matrice avec un teneur plus élevée en silice soluble (MKDNW2 soit SiO2/Na2O=0,69)) est celle qui a la résistance à la compression la plus élevée.

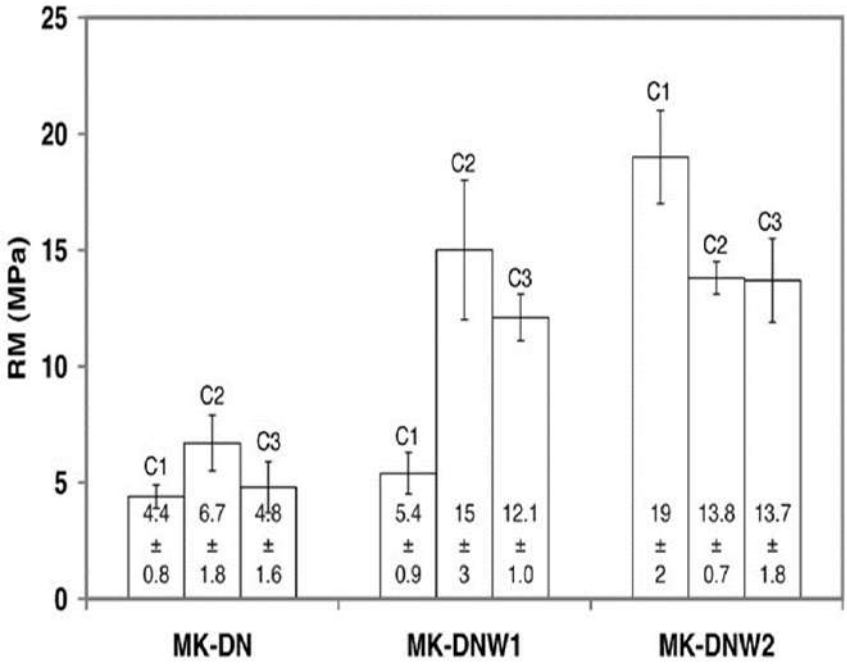


Figure I. 47.Résistance mécanique à compression en fonction du processus de durcissement et de la composition de la matrice[51]

I.7.3. Influence de la température de maturation

Selon Alonso et Palomo, 2001et Monzó et al. **[**51, 52**]**la température accélère l'activation alcaline d'un mélange solide de métakaolin et d'hydroxyde de sodium entrainant une formation plus rapide (accélération du processus de polymérisation) du produit final.

Alonso et Palomo ont étudié l'activation alcaline de métakaolin avec du Ca(OH)2 à différentes températures par conduction calorimétrique**[**50, 52**]**. Ils ont attribué l'allure des courbes calorimétriques à la dissolution, la précipitation des phases aluminosilicates amorphes, et la formation de phases de zéolithe. Ils ont aussi observé que la cinétique de la réaction est d'autant plus rapide que la température est élevée. Par contre, une température trop élevée peut fragiliser la structure et diminuer les performances mécaniques du géopolymère (Figure 1.11). Ceci serait sans doute lié à la perte d'une partie de l'eau de cohésion, ce qui suggère la nécessité de maintenir de petites quantités d'eau structurelle pour réduire l'apparition de fissures et maintenir l'intégrité structurelle du matériau. En outre, une température excessivement élevée accélère la cinétique de réaction en favorisant la cristallisation de zéolithes au détriment de la quantité de gel NASH **[**51**].**

I.7.4. Influence de la concentration d'hydroxyde de sodium

Des études réalisées par Torgal et al., 2011] ont montré que l'augmentation de la concentration d'hydroxyde de sodium permet une augmentation de la résistance à la compression, mais cela se produit seulement au-delà de 7 jours de durcissement et la maniabilité du mortier diminue avec l'augmentation de la concentration d'hydroxyde de sodium **[53]**.Des concentrations élevées de la solution alcaline augmentent le pH, ce qui entraine une augmentation de la dissolution et de la solubilité des résidus minéraux d'aluminosilicate. Une quantité suffisante d'ions positifs (tels Na+) sont donc disponibles pour équilibrer la charge négative des groupements aluminates. Par contre, un excès en sodium (en raison de l'augmentation de la concentration de l'activateur) peut conduire à la cristallisation de sodalite, ou faujasite, qui a un effet négatif sur le développement de la résistance**[54]**.

I.7.5. Influence du rapport molaire silicium/aluminium (Si/Al)

Le mécanisme de durcissement d'un liant aluminosilicate obtenu par activation alcaline implique la dissolution de la silice et de l'alumine, en présence d'hydroxyde de sodium suivie par la précipitation du silicate de calcium hydraté ou de gel silico aluminate alcalin selon le matériau activé **[55]**.La résistance d'un matériau géo polymérique est fortement dépendante des rapports molaires Si/Al et Na/Al du matériau. La présence de silice soluble dans la solution d'activation conduit à la formation de gels de rapport Si/Al plus élevé et par conséquent, à la diminution de la vitesse de la formation de zéolite, facteurs qui ont un effet positif sur la résistance mécanique**[54, 56]**.

I.7.6. Effet des activateurs alcalins sur les additions

I.7.6.1. Effet de NAOH sur le laitier de haut fourneau et les cendres volantes

Escalante García et al ont étudié les produits d'hydratation et la réactivité des laitiers de haut fourneau avec différents activateurs. Les activateurs utilisés sont NaOH, une solution de silicate de sodium (ou water glass, WG) et un mélange des trois composés Na2CO3, Na2SO4 et Ca(OH)2**[57]**. D'après ces auteurs, le NaOH semble plus efficace que les autres activateurs, car son utilisation donne les meilleures propriétés mécaniques à jeune âge et à long-terme. Le silicate de sodium est de loin l'activateur qui donne des résultats moins intéressants ce qui est en contradiction avec les résultats obtenus par d'autres auteurs tels Fernández-Jiménez et al.,1999]**[58]**. Cette différence serait liée au rapport molaire.

Si O2/Na2O qui serait trop élevé et du pH plus faible dans le cas étudié par Escalante García et al., 2003 qui a utilisé la solution de silicate sans ajout de NaOH rendant ainsi les espèces silicates moins réactives. En effet, l'efficacité de la solution de silicate de sodium réside dans la réactivité des espèces en solution et du pH qui ne sont possibles que par ajout supplémentaire d'un hydroxyde alcalin pour diminuer le rapport SiO2/Na2O et augmenter le pH de la solution **[57]**Ce qui a pour conséquence, la formation de petites espèces silicatées (monomères) plus réactives chargées négativement par rupture des liaisons Si-O-Si des oligomères (polymères). Un autre paramètre important dans le cas de l'activation du laitier est le rapport molaire Si/Al**[57]**.

Somna et al. Ont étudié la formation de géopolymères par l'activation à température ambiante des cendres volantes avec NaOH. Selon ces auteurs, l'augmentation de la concentration de NaOH entraine une augmentation des résistances mécaniques de la pâte. Une nette augmentation de 7 à 23 MPa de la compression à 60 jours, peut être observée lorsque la concentration de NaOH augmente de 4,5 à 9,5M **[59].** Une résistance maximale de 25,5 MPa à 60jours a été obtenue avec une concentration de NaOH de 14M. Cependant, une forte augmentation de la concentration au-delà de cette valeur a tendance à décroitre les performances mécaniques des géopolymères. Lorsque la concentration en OH- est suffisamment élevée, la dissolution de la cendre volante est accélérée, mais est entravée par des réactions de polycondensation**[60]**. Une augmentation de la concentration en alcali augmente la résistance des géopolymères, toutefois, un excès en ions hydroxydes cause la précipitation prématurée de gel d'aluminosilicate à jeune âge, conduisant à la formation de géopolymères moins résistants.

Dans une autre étude Palomo et al., portant sur l'activation des cendres volantes avec différents activateurs (KOH, NaOH et solution de silicate de sodium), il a été montré que l'activation avec l'hydroxyde de potassium donne des résultats moins intéressants que l'hydroxyde de sodium, liés sans doute à la grande taille et à la réactivité plus faible du potassium **[61, 62]** .Selon ces auteurs, l'ajout d'une petite quantité de silicate de sodium à la solution d'activation conduit à l'obtention d'une microstructure dense et plus compacte. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par Palomo et Fernández-Jiménez, 2011**[62]**qui ont montré que les activateurs contenant une certaine quantité de silice soluble sont capables d'améliorer la réactivité des cendres ou même stimuler une plus grande polymérisation (riche en silice) conduisant à l'obtention d'un produit final plus compact et mécaniquement plus résistant.

Par ailleurs, plusieurs travaux de recherche montrent que les cendres volantes ont un énorme potentiel pour élaborer des bétons géopolymères. Hardjito et al., 2004 ; Raijiwala et Patil, 2012 ; Kong et Sanjayan, 2010 ; Wongpa et al., 2010] ont montré que les bétons à base de cendre volante présentent une meilleure durabilité contre des milieux agressifs tels que les acides, les sulfates et l'eau de mer, par rapport aux matériaux traditionnels à base de ciment Portland **[63, 64]**.

L'augmentation de la réactivité chimique de (laitiers de haut fourneau, cendres volantes) passe par 3 étapes **[54, 56, 65]**.

1.La dissolution des espèces solubles dans la phase alcaline

2.Une réorganisation et une diffusion des ions dissous avec la formation de petites structures coagulées,

3.La croissance et la condensation de ces structures pour former les produits hydratés.

L'incorporation d'alcalins contribue à augmenter le pH de la solution interstitielle. D'après l'étape N°01, il est donc compréhensible qu'une activation alcaline puisse accentuer la dissolution des phases siliceuses dans les laitiers (système Si-Ca), siliceuses et alumineuses dans les cendres volantes et les métakaolin (système Si-Al) puisque cette dissolution est largement accentuée avec l'augmentation du pH au-dessus de 12,5**[66]**.

Des études ont montré l'efficacité d'activateurs alcalins sur l'accentuation de la pouzzolanicité des laitiers et des cendres et l'amélioration de la résistance au jeune âge de la matrice cimentaire résultante. **[67, 68]**

D'après Shi et al., les propriétés des activants qui contiennent du sodium et du potassium sont très similaires, mais contrairement aux produits à base de potassium**[68]**, les activants NaOH, Na2CO3, Na2O.SiO2 et Na2SO4,… sont les plus largement disponibles et commercialisés. Les activants ne sont pas de simples catalyseurs permettant le déroulement des réactions mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates **[69]**.

L'utilisation d'eau alcalinisée à la place de l'eau pure permet d'augmenter la solubilité du laitier et donc d'accélérer l'hydratation de ce dernier. En effet, la précipitation des hydrates à partir des ions passés en solution sera plus rapide avec des concentrations plus fortes en solution **[70]**.

L'évolution dans le temps de l'hydratation de laitier activé par Na2CO3 est présentée :

•20 minutes : précipitation de CaCO3 cristallisé à la surface des grains de laitier.

• 2 heures : précipitation plus importante de CaCO3 et C-S-H. L'attaque par OH- est encore possible **[71]**.

•1 jour : les grains sont presque entièrement recouverts par C-S-H ayant la morphologie « Foil-like » courante.

•3 jours : la structure est encore plus dense avec présence de C-S-H et C3A.CaCO3.12H2O mis en évidence par DRX.

De récentes recherches Redden et Neithalath, 2014 ont confirmé la formation d'un gel de silicate de sodium lorsque la poudre de verre est activée avec NaOH à la différence du gel NASH formé lorsque 50% de poudre de verre est remplacé par la cendre volante [72]. Ceci est dû à l'absence d'aluminium dans la poudre de verre. Les gels de silicate de sodium présentent des problèmes de lixiviation des alcalis lorsqu'ils sont exposés à des conditions de murissement humide qui introduisent une faiblesse dans la structure du gel. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par Cyr et al., 2012 qui ont corroboré que la durabilité des géopolymères à base de poudre de verre est affectée par la cure humide, probablement par le manque d'aluminium [43, 73].

Le temps de prise de pâtes de laitier activé par Na2CO3, NaOH et du silicate de sodium (de module n = 3,35 et n = 0,9) ne semble pas être affecté jusqu'à une finesse Blaine du laitier de 530m²/kg. L'activation par Na2CO3 permet d'obtenir un temps de prise d'environ 100 minutes, soit plus que l'activation par NaOH et le silicate de sodium de module n = 0,9.

Dans le système MK/chaux, [49, 74] montre que la soude et le carbonate de sodium entraînent plus rapidement la période de prise et raccourcissent cette dernière significativement, par comparaison au sulfate de sodium.

Dans un système pouzzolane naturelle-chaux, le sulfate de calcium accélère très peu la prise en comparant avec le mélange de référence [75].

L'accélération de la prise est observée dans des mortiers de laitier (mortier contenant du laitier) lorsqu'ils incorporent de la soude ou du carbonate de sodium, par comparaison avec le mortier de ciment seul **[76]** montre des augmentations significatives de la consistance des mélanges frais lorsque du silicate de soude est utilisé et dans ce cas, l'accélération de la prise est la plus importante ; il attribue le changement de rhéologie à la présence des anions $SiO3^{2-}$ introduits en solution et qui viennent s'ajouter aux silicates du laitier.

Une accélération de la prise est pareillement constatée sur des combinaisons clinker/laitier en présence de sulfate de calcium **[77]**. Ces auteurs montrent que l'augmentation de la quantité de l'activant peut accentuer l'apparition précoce de la prise. Cela est confirmé par **[49, 74]** avec la soude (Figure 51).

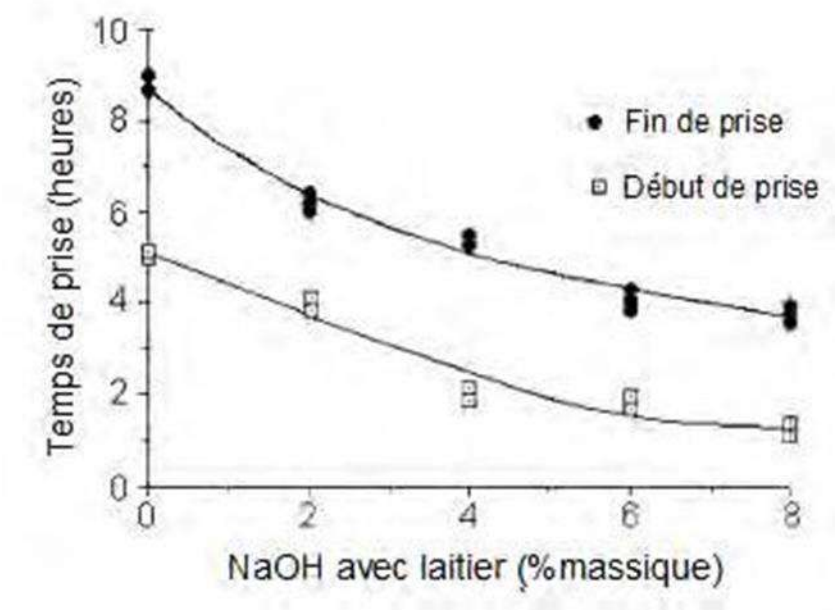


Figure I. 48..IV'Effet du dosage de NaOH sur le temps de prise d'un mélange contenant 50% ciment et 50%laitier[49, 74]

La résistance en compression de mortiers activés avec 6 % (en masse de Na2O) de soude, de carbonate de sodium et de silicate de sodium a été étudiée par **[49]**, la montée en résistance est donnée jusqu'à 180 jours, à court et long termes, le mortier le plus résistant est celui activé par le silicate de sodium. Ses résistances sont plus élevées que celles du mortier de ciment pris en référence. L'activation par le carbonate de sodium donne des performances du même ordre de grandeur que la référence à base de ciment Portland. Par contre, l'activation par la soude confère des performances relativement faibles à toutes les échéances de mesure. Des chercheurs, **[61]** ont élaboré des bétons à base de cendres volantes activés avec du NaOH et une solution de silicate de sodium à différentes températures et temps de maturation. Des matériaux présentant des propriétés spéciales (monologues, revêtements résistants au feu…) ont été obtenus. Ces matériaux développent des résistances mécaniques élevées dans une période de temps relativement court (30MPa après 6 heures à 95°C et 40MPa à 115°C).

Cyr et al., 2012 ont élaboré des géopolymères à base de poudre de verre utilisant comme activateurs alcalins le NaOH et le KOH avec des concentrations de 1, 5 et 10M. Ils ont montré qu'une activation thermique de 40-60°C était nécessaire pour développer des propriétés mécaniques et des résistances en compression allant jusqu'à 60 MPa ont pu être obtenues pour des géopolymères activés avec KOH 5 mol et une température d'activation thermique de 40°C**[73]**. D'autres auteurs comme Lin et al., 2012 ont étudié aussi le potentiel de l'utilisation de la poudre de verre électronique comme remplacement jusqu'à 40% du métakaolin pour l'élaboration de géopolymères**[78]**. Leur étude est basée sur l'effet des rapports SiO2/Na2O et solide/liquide et du taux de remplacement de poudre de verre par métakaolin sur la résistance à la compression. Les résultats démontrent la possibilité de l'utilisation de la poudre de verre pour la fabrication de géopolymères. Puisque des géopolymères composés de 10% de poudre de verre et de 90% de métakaolin présentant des résistances à la compression de 46,9, 61,8 et 62 MPa à 1, 28 et 60 jours respectivement, ont pu être développés.

Deux méthodes d'introduction des activant dans les mortiers sont testé. La première méthode consiste à l'ajout directement dans le liant (ciment seul ou ciment plus métakaolin) de l'activant(s), la seconde méthode consiste à la dilution de l'activant dans l'eau pour avoir une solution activant(e).

• Préparation d'un mortier contient 75% de ciment avec 25% de métakaolin et 2M (4% de poids de liant) d'hydroxyde de sodium NaOH.

Selon les résultats présentés, l'utilisation de la solution activant préparée d'après la dissolution d'un activant dans l'eau a un effet néfaste sur la résistance au jeune âge pour la plupart des activants utilisés. L'hydroxyde de potassium (KH) ne se mélange pas correctement dans le solide (liant) à cause de sa forme non poudreuse, mais il est dissout dans l'eau pour former la solution de KOH qui correspond à la concentration visée dans le mortier. Cet activant n'a aucun effet sur la réactivité du métakaolin.

Cet effet néfaste apparait aussi lors de l'utilisation des autres activants (Na2SO4, K2SO4, K2CO3, Na2CO3…) dans l'eau, d'après les résultats des tests de maniabilité (temps d'écoulement du mortier) et de résistance mécanique à la compression des mortiers étudiés.**[65]**

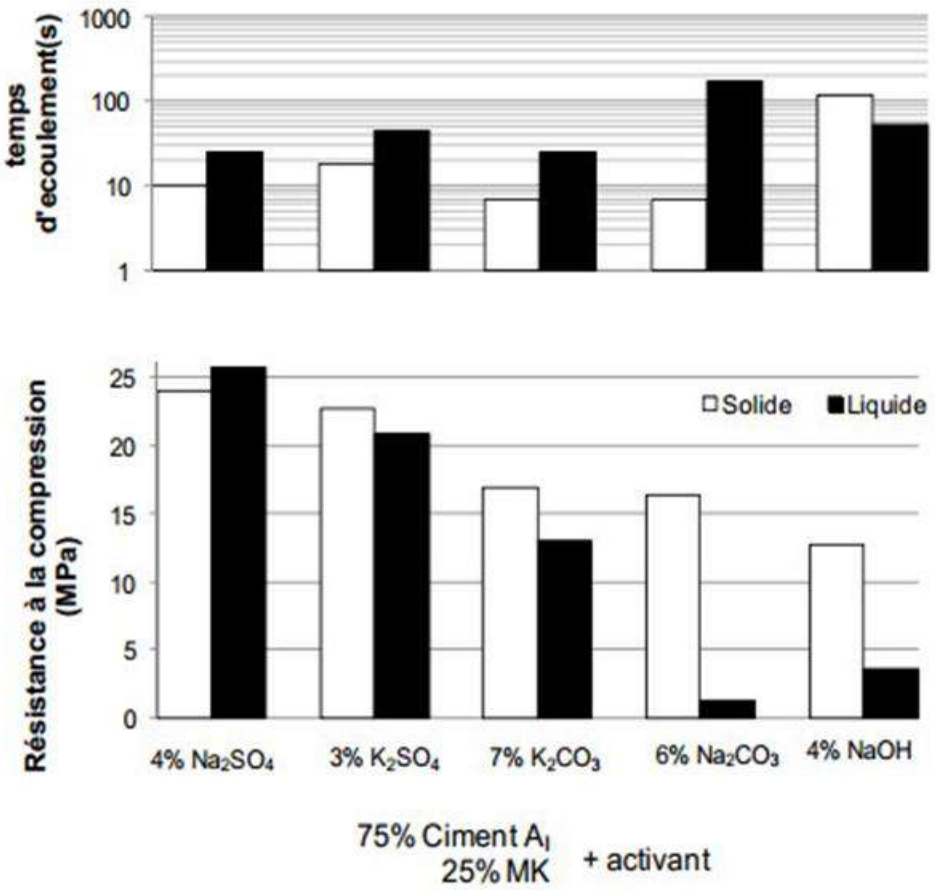


Figure I. 49.Résistance à la compression (24h) et le temps d'écoulement de mortiers contenant des activants soit dissous dans l'eau de gâchage, ou utilisés comme poudre mélangée avec le liant.[65]

Les résultats de la Figure 52, montrent que l'introduction de l'activant dans l'eau sous forme d'une solution entraine soit une chute de la résistance à la compression et une chute de la maniabilité soit un effet semblable à l'introduction dans le solide comme pour le cas des sulfates de sodium NS et de potassium KS. On constate qu'il est préférable d'ajouter l'activant directement dans le solide, qui est plus pratique aussi pour l'industrie. L'utilisation de la solution activant n'apporte aucun avantage, en plus il faut dissoudre l'activant avant de l'utiliser. [65]

L'amélioration de la maniabilité des mortiers à l'aide de superplastifiants pour faciliter la mise en place et ainsi pour éviter la création d'une porosité néfaste au développement des résistances. En effet, le temps d'écoulement au ManiabilimètreLCPC est fortement affecté par l'ajout d'hydroxydes alcalins NaOH.

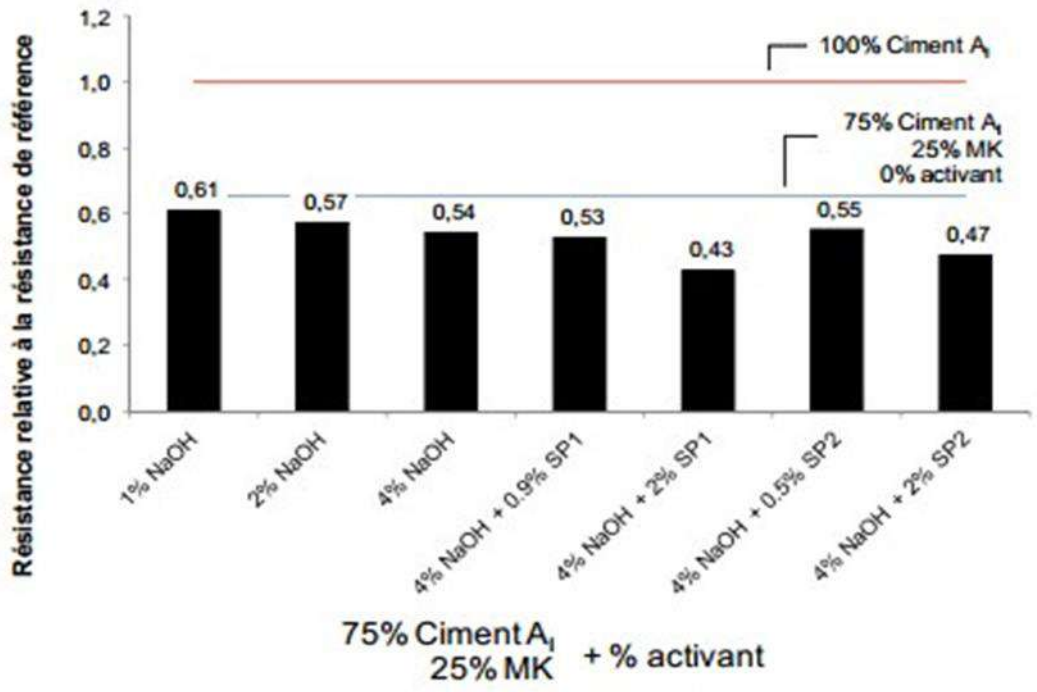


Figure I. 50. Résistance relative à 24h par rapport à la résistance de référence (100% ciment) de mortiers contenant différentes concentrations en NaOH et en superplastifiants. Comparaison aux mortiers sans activants.[65]

De Silva et Glasser rapportent que le système MK/chaux activé avec de la soude ou du sulfate de calcium présente par rapport au mélange non activé, des résistances plus élevées jusqu'à 28 jours et plus faibles à 90 jours et à 180 jours**[79]**. Les mélanges activés présentent néanmoins une augmentation de résistance jusqu'à 180 jours. Ces résultats sont confirmés par Jiang [49, 74] à l'échéance de 28 jours : la soude et le sulfate de calcium augmentent la résistance, en particulier NaOH. Le même auteur montre que le carbonate de calcium n'a pas d'effet sur la résistance à 28 jours. Shi et Day Shi et Day, 1993a, 1993b, rapporté par Shi, 2001 montrent aussi une augmentation des résistances à tous les âges dès lors que le système pouzzolane (80%) /chaux (20%) est activé avec 4% de sulfate de sodium **[66, 80, 81]**.

Marciano et Bettagin montrent que, sur mortier incorporant des ciments au laitier avec activant, les performances sont systématiquement plus élevées à un jour, plus faibles dès 7 jours, par rapport aux performances du mélange de référence (Figure I- 18). Il apparaît que les sulfates alcalins sont les activants les plus efficaces, à savoir qu'ils permettent les meilleures résistances à 1 jour, et qu'ils limitent la baisse ou conservent le niveau de résistance à 28 jours. Au contraire, Singh et al [Singh et al., 2001] rapportent une amélioration des résistances lorsque 4% de sulfate de sodium sont ajoutés à un mélange contenant 50% de laitier et 50% de clinker**[77]**.

A travers cette étude bibliographique, on va proposer un protocole expérimental pour la réactivation des ciments périmés, à savoir le broyage à une finesse semblable au ciment témoin, différentes températures de calcination, l'utilisation d'un activateur alcalin avec plusieurs pourcentages, et la combinaison de ces procédés d'activations.

Conclusion

Sur la base de la synthèse bibliographique ; on va étudier l'effet combiné de température de calcination et de l'activation chimique en utilisant le NaOH ; les températures étudiées et les pourcentages du NaOH sont illustrés dans le 2éme chapitre (matériaux et essais).

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET ESSAIS

II.1. Introduction

Dans cette partie expérimentale, nous proposons une nouvelle démarche pour formuler le Mortier ordinaire (MO) à base des déchets de brique, nous étions obligés de réalisé un certain nombre d'essais pour la détermination des caractéristiques des matériaux utilisés et leurs propriétés, d'autre part la détermination de la formulation doit être définie avec le plus grand soin possible à travers la détermination des différents paramètres agissant sur la formulation d'un mortier à savoir :

- La granularité ou le fuseau granulaire du squelette.
- Les dosages en sable, ciment, eau et déchets de brique.
- Le rapport Eau/liant (E/L).

Pour répondre aux différentes questions de cette étude, quatre familles de mortier ont été réalisés. La nomenclature choisis est représentée dans le tableau suivant (Tableau II.1) :

Tableau II. 1: Différents compositions utilisées dans la recherche

Notation	Désignation
MT	M Témoin
M-T-X%	Mortier à base de poudre de brique cuite recyclé (PBR) avec quatre températures de calcination • T= 600, 800, 1000°C et sans calcination • X : différents pourcentages utilisés. (5, 10,15, 20,25 et 30%) • La finesse des poudres est fixée de 5200(cm^2/g)
M-NC-10%-Y%	Mortier ordinaire à base de poudre de brique cuite non calcinée • Y% : Le pourcentage du NaOH (2,4 ,6 et 8%)

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés

Pour la confection des mortiers, des matériaux locaux de la wilaya de Médéa sont caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil tout en assurant les recommandations des normes en vigueur.

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Mâtine) **(**Figure II.1), est un ciment Portland artificiel dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de LAFARGE dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442]

[82]. Le tableau II.2 résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment.

Tableau II. 2: L'analyse chimique du ciment et composition du clinker

Analyse chimique Du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042)	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition Hypothétique du Clinker	Silicates tricalciques C_3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C_3A (%)	6.00-8.00

Voir la fiche technique en <annexe A > pour avoir plus de détaille sur ce ciment



Figure II. 1.le ciment utilisé (Annexe A)

II.2.2. Sable

Pour cette étude nous avons utilisé un sable de (oued Souf) avec module de finesse environ 2.35 dont leurs caractéristiques sont représentées dans le tableauII.3. La figure II.2représente la courbe granulométrique du sable utilisé.

Tableau II. 3: Propriétés physiques d'identification des sables utilisés

Caractéristiques			**Normes**
Provenance	Oued souf		
Classe granulaire	0/3		NF EN 933-1[83]
Module de finesse De sable	2.35		
Masse volumique Absolue (g/cm3)	2.61		NF EN 1097-6[82]
Masse volumique Apparent (g/cm3)	1.64		NF EN459-2 [84]
Equivalent de sable (%)	A vue=83.96%	A piston =70.37%	NF EN 933-8[85]
Taux d'absorption total d'eau (%)	1.40%		

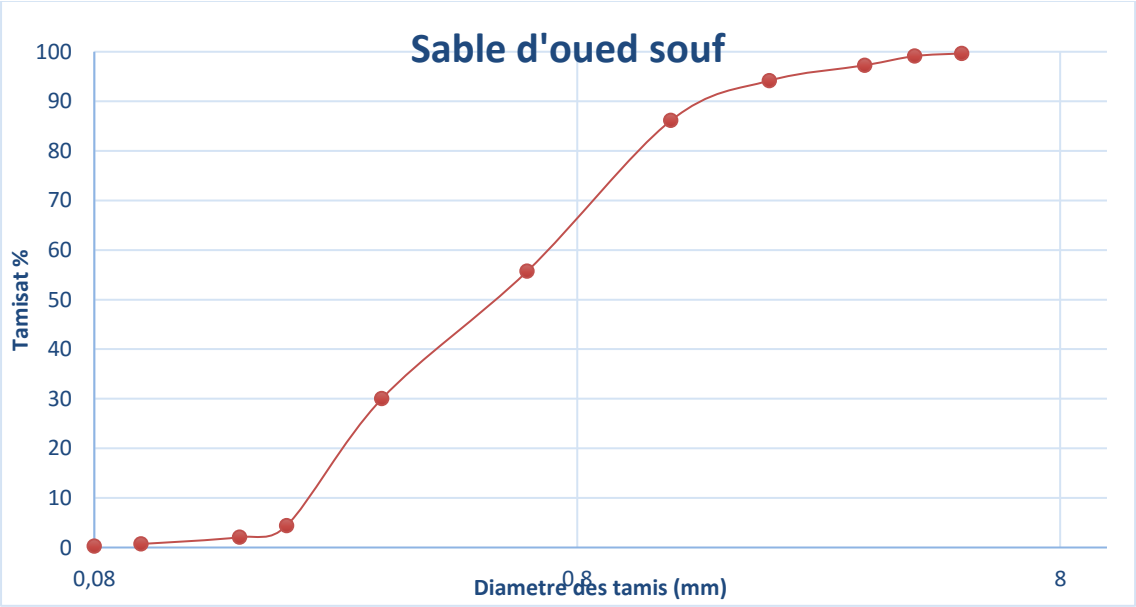


Figure II. 2.Courbe granulométrique de sable utilisé

II.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mortiers est celle du robinet considéré comme potable, exempte de toute impureté nuisible au mortier et conforme à la norme NF EN 1008**[86]**. Sa température est comprise entre 18 et 20°C.

II.2.4. Déchets de brique cuite

Les déchets de brique cuite utilisée dans ce travail de recherche proviennent de la briqueterie de Draa-Smar de la wilaya de Médéa sous forme :

- Une poudre de brique PBR

II.2.4.1. Recyclage et caractérisation des déchets de brique cuite

Notre travail consiste une méthode pour le recyclage des déchets de brique cuite qui est résumé comme suit :

A- Poudre de brique recyclé (PBR)

1) Concassage :

Les déchets une fois réceptionnés, ils ont fait l'objet d'un concassage par un concasseur à mâchoires de laboratoire (figureII.3) qui nous a permet d'obtenir un matériau dont les grains sont de dimensions 0-5 mm

La figure II.3montre les étapes précédentes



Figure II. 3. Protocole de concassage des déchets de brique cuite.

2) Calcination :

Une fois les déchets de brique sont concassés, ils sont disposés dans un four à moufle à dans différentes températures de calcination 600°C, 800°C et 1000°C .



Figure II. 4.Calcination des Déchets de brique

3)Broyage :

D'après les résultats obtenus par OUZADID nous avons fixé une finesse de **5200(cm^2/g)** selon la norme NFP15-476suivant un protocole de broyage indiqué par la suite :

- **PBR non calciné** : Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 7 min. **(**Figure II.5**)**
- **PBR calciné à 600°C :** Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 5 min. **(**Figure II.5**)**
- **PBR calciné à 800°C :** Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 10 min. **(**Figure II.5**).**
- **PBR calciné à 1000°C :** Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 2 min. **(**Figure II.5**)**



Figure II. 5.Protocole d'obtention des finesses de PBR

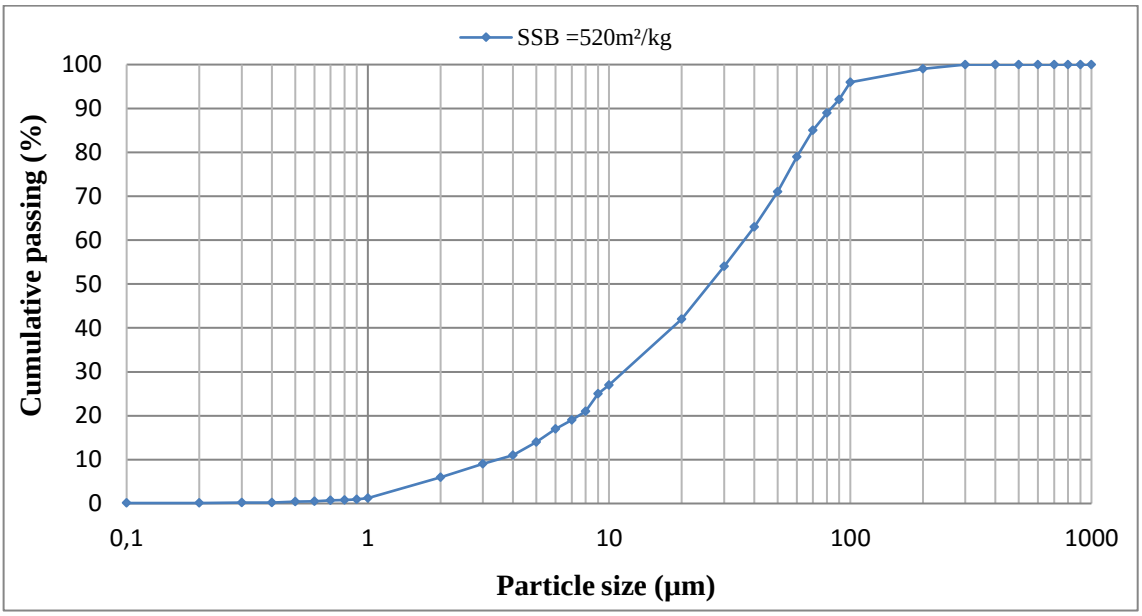


Figure II. 6Analyse chimique des PBR par infrarouge (FTIR)

II.2.4.2. Protocole de La spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est un moyen de diagnostic permettant de déterminer la nature des liaisons chimiques présentes dans une molécule**[87]**. En effet, l'expérience montre que certaines fréquences de vibration, dites « fréquences de groupe », sont caractéristiques de la présence d'un groupement chimique dans la molécule étudiée**[88]**.

A-Appareillage et protocole

L'appareillage utilisé est un spectroscope infrarouge à transformée de Fourier. Il est constitué de quatre éléments fondamentaux : la source infrarouge, un interféromètre, un détecteur et l'électronique de calcul.

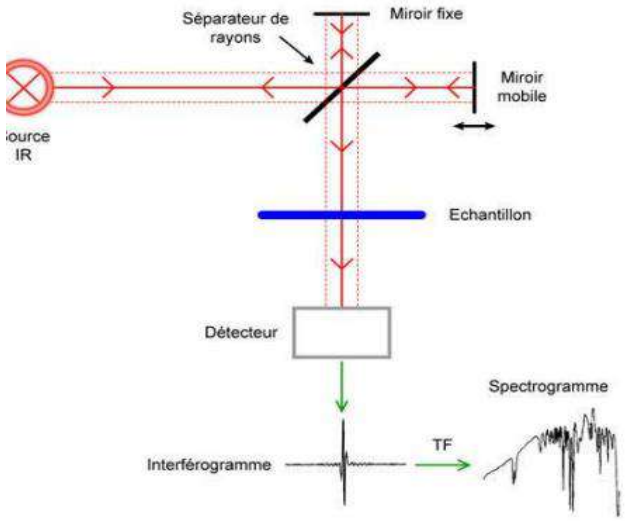


Figure II. 7.Schéma de principe de l'analyse par spectroscopie d'absorption infrarouge

B-Préparation de l'échantillon en pastille de KBr

L'échantillon est déposé d'ans un moule puis semis a une très forte pression dans une presse hydraulique .il est ensuite extrait du moule sous la forme d'une pastille.

C- Acquisition des spectres d'absorption FTIR

Le porte d'échantillon contente la pastille KBr est placé dans le compartiment de mesure du spectro sur le trajet de fiscaux incident. Le signale enregistré par le détecteur du spectro prend en compte, non seulement l'absorption du rayonnement l'IR par le produit à étudier, mais aussi par l'air présente dans le compartiment de mesure et éventuellement par le KBr s'il n'est pas complètement anhydre.il faut donc enregistrer un spectre de bruit de fond de l'air éventuellement d'une pastille de KBr pure), qui sera ensuite soustrait du spectre obtenu avec la pastille contentent l'échantillon. Ce la permit de se débarrasser des absorptions parasites. Les spectres sont enregistrés en transmutantes. Les spectres de chaque type de ciment seront présentés dans la partie des ANEXES.

II.3. Formulations des mortiers

II.3.1. Mortier témoin

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériau du gâchée, afin d'obtenir un mortier avec des propriétés souhaitées.
Notre étude est focalisée sur l'influence de l'ajout des déchets de brique issues du forme (PBR) sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un mortier.
Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment et eau, nous nous sommes basés la méthode normalisée de formulation d'un mortier normal (S/C = 3 et E/C = 0,5), les différentes compositions sont présentées dans le tableau II.4

II.3.2. Mortiers à base de déchets recyclés

Pour l'ensemble des mortiers à base de déchets recyclés, les rapports S/C et E/C sont fixés à 3 et 0,5 respectivement et correspond au mortier témoin.

Le mortier à base de déchet est fabriqué (M-T-X%), en faisant substituer une partie du poids de ciment par une quantité similaire en poudre de brique comparé au mortier témoin. Les taux de remplacement des poudres recyclées, sont choisis de 5% à 30 % (tableau II.4**)**

Tableau II. 4: les composantes des mortiers formulés à base des déchets de brique

Type de mortier	Substitution (%)	Ciment (Kg)	Sable0/3 (Kg)	Eau (Kg)	Déchets de brique(kg)
MT	**0**	0.450	1.350	0.271	0
Non calciné	**5**	0.4273	1.350	0.271	0.01885
	10	0.4045	1.350	0.271	0.0377
	15	0.3821	1.350	0.271	0.05655
	20	0.3596	1.350	0.271	0.0754
	25	0.3371	1.350	0.271	0.0942
	30	0.3147	1.350	0.271	0.1131
600°C	**5**	0.4273	1.350	0.271	0.01885
	10	0.4045	1.350	0.271	0.0377
	15	0.3821	1.350	0.271	0.05655
	20	0.3596	1.350	0.271	0.0754
	25	0.3371	1.350	0.271	0.0942
	30	0.3147	1.350	0.271	0.1131
800°C	**5**	0.4273	1.350	0.271	0.01885
	10	0.4045	1.350	0.271	0.0377
	15	0.3821	1.350	0.271	0.05655
	20	0.3596	1.350	0.271	0.0754
	25	0.3371	1.350	0.271	0.0942
	30	0.3147	1.350	0.271	0.1131
1000°C	**5**	0.4273	1.350	0.271	0.01885
	10	0.4045	1.350	0.271	0.0377
	15	0.3821	1.350	0.271	0.05655
	20	0.3596	1.350	0.271	0.0754
	25	0.3371	1.350	0.271	0.0942
	30	0.3147	1.350	0.271	0.1131

II.3.3. Séquence de malaxage du mortier

Pour la confection des mortiers, nous avons utilisé un malaxeur de 5 litres de capacité (Figure II.8). Le mortier normalisé est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme en vigueur NF EN 196-1.



Figure II. 8. Séquence de malaxage du mortier ordinaire

II.3.3.1. Mortier à base de PBR sans activateur alcalin

Les mortiers ont été préparés suivant la norme NF EN 196-1. Avec une gâchée qui comporte : 450± 2 g de ciment, 1350 ± 5 g de sable et 225± 1g d'eau. Le rapport E/C est égal à 0.5.

Tableau II. 5: mode de malaxage du mortier à base de PBR sans activateur alcalin

Tableau II.4 :	**Durée**	**Etat du malaxeur**
Introduction du ciment + PBR	15 s	Arrêt
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction d'eau	15s	Vitesse lente
Malaxage	30s	
Introduction du sable	30s	Vitesse lente
Malaxage	30s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve +Repos	1 min 30 s	
Malaxage	60s	Vitesse rapide

II.3.3.2. Mortier à base de PBR avec activateur (NaOH)

L'optimisation du pourcentage du NaOH consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer des performances meilleures à l'état durci. On a varié le pourcentage du NaOH de 4% à 8 %, avec un pas de 2%, en fixant le rapport E/C= 0,50.

La séquence de malaxage suit les étapes suivantes **:**

Tableau II. 6: mode de malaxage du mortier a base de PBR avec activateur

Opérations	**Durée**	**Etat du malaxeur**
Broyage (PBR+NaOH)	4min	
ıtroduction du ciment + PBR+NaOH	15s	Arrêt
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction d'eau	15s	
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30s	
Malaxage	30s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve +Repos	1 min 30 s	
Malaxage	60s	Vitesse rapide

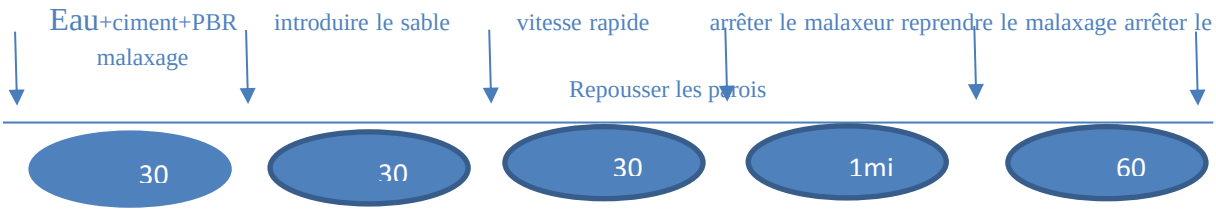


Figure II. 9.Préparation et Conservation des Eprouvettes



Figure II. 10.Hydroxyde de sodium (NaOH)

II.4. Préparation et Conservation des Eprouvettes

La préparation des éprouvettes (40X40X160 mm^3) du mortier normal effectuée selon la norme EN 196-1**[89].**

Les éprouvettes sont de forme prismatique de section carré (40X40X160 mm^3). Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier. Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveaupar60chocs.

Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée.



Figure I. 51.Moulage et conservation des d'éprouvettes prismatiques.

Après le démoulage d'échantillons ont laissé pendant 24 heures pour sécher relativement, après cette période, nous mettons les échantillons, dans le bac d'eau à une température de 20±2°C.

II.5. Les essais sur mortier

II.5.1. Etat frais

II.5.1.1. Consistance normale (EN 196-3) :

La pâte de ciment est essentiellement constituée d'eau et de ciment, vis-à-vis de ces deux éléments sa composition est définie par le rapport E/C. Dans ce rapport E et C représentent les concentrations d'eau et de ciment exprimées en masse pour un volume unité de pâte. La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Un essai normalisé permet d'apprécier cette consistance.

L'essais de consistance est effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN196-3, la consistance est évaluée ici 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 II. 11.Consistance Vicat

La distance (d) caractérise l'aptitude de la consistance de la pâte étudiée. - Si (d) = 6mm ± 1mm, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée, (Consistance normalisée). - Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d. d > 7 mm ou d < 5mm), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance

II.5.1.2. Essai de prise (NF P15-473)

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.

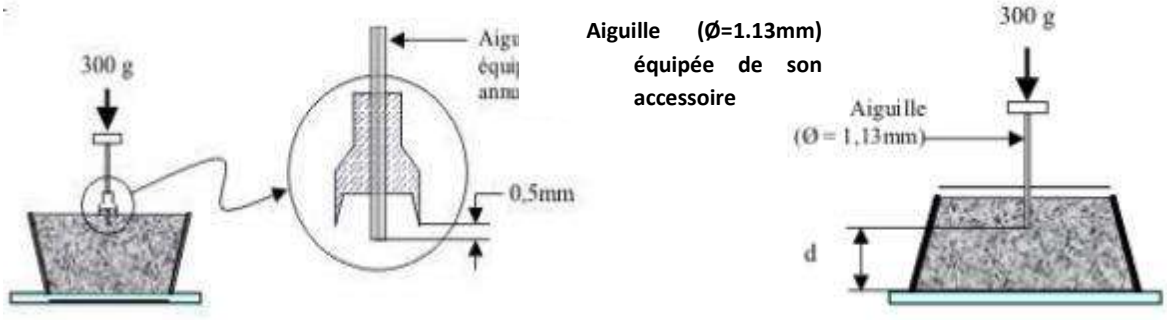


Figure II. 12.Détermination du temps de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance (d = 4 mm ±1 mm) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment selon la norme NF P15-473. De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus que de0, 5mm dans l'anneau.

II.5.1.3. Maniabilité (NF P18-452et NF P18-437)

❖ **Essais de temps d'écoulement**

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide d'appareil de maniabilimétre LCL, il consiste en un boitier parallélépipédique métallique a des dimension connus, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibrateur et muni d'une cloison amovible. Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place 4 couche, chaque couche étant soumise à6coups au moyen de la tige de piquage,4minute après la fin du malaxage la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre, sous l'effet de la vibration le mortier S'écoule, le chronomètre est arrête quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boitier, le temps « t »mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance

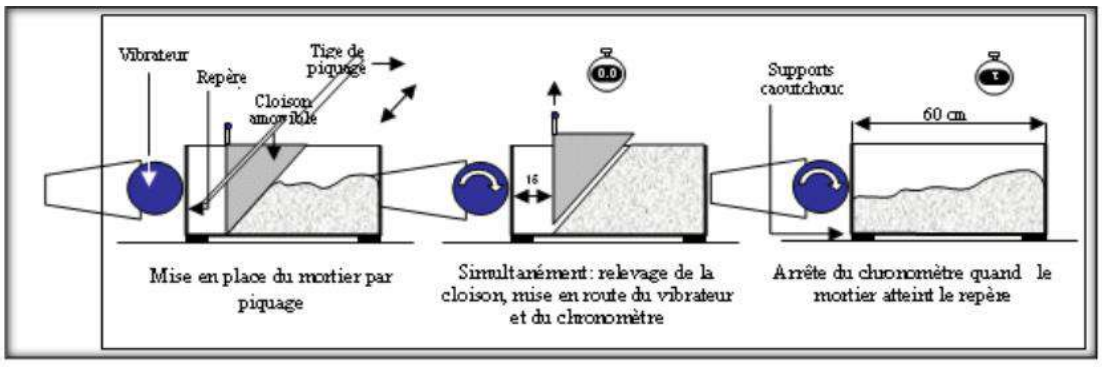


Figure II. 13.Principe de fonctionnement du maniabilimétre LCPC

II.5.2. Etat durci

II.5.2.1. Résistance à la traction par flexion

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme [EN 196-1] [90]. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Figure II.11), une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L.

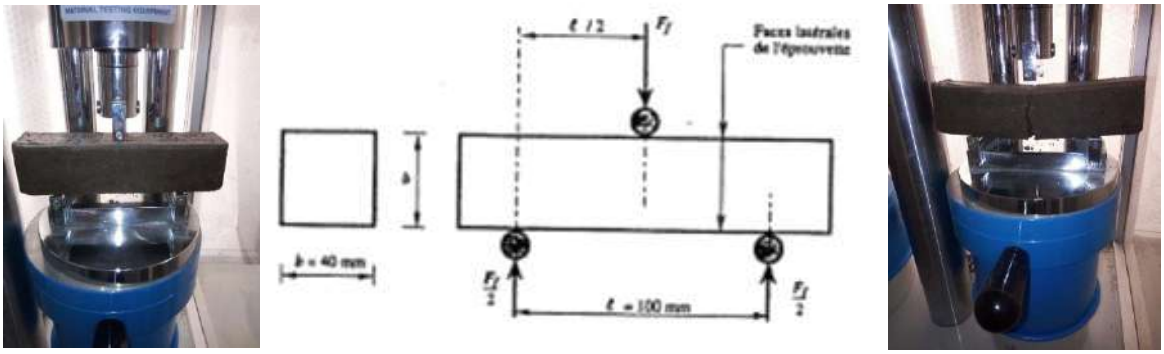


Figure II. 14.Essai de traction par flexion sur mortier

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v$$

Avec :

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge : $M = \frac{F_f L}{4}$

I : Moment d'inertie de la section transversale : $I = \frac{a^4}{12}$

v : La distance de la fibre inférieure la plus éloignée : $v = \frac{a}{2}$

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{a^3}$$

II.5.2.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] **[90]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques après rompre en flexion à l'âge de 3, 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN (Figure II.12). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (03) demi-prismes des trois éprouvettes.

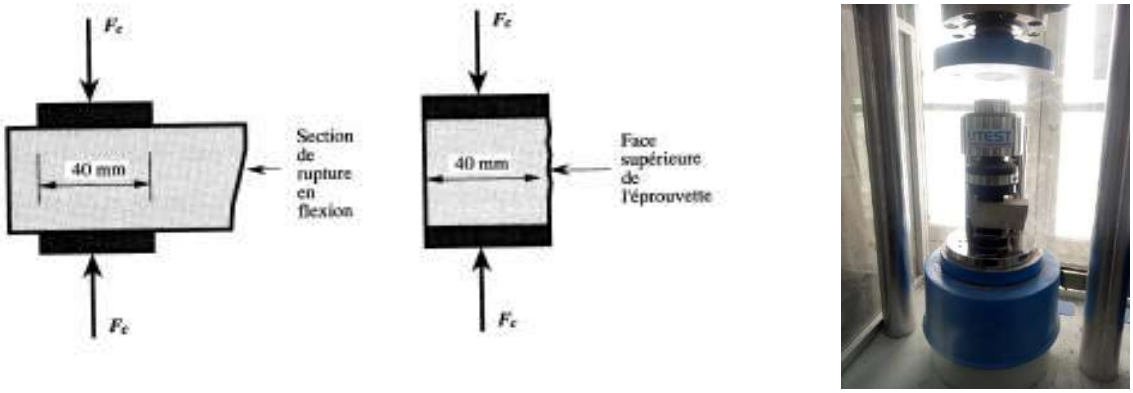


Figure II. 15.Essai de compression sur mortier

Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra : $\sigma_c = \frac{F_c}{a^2}$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$f_{c28}\,(\text{MPa}) = \frac{F_c\,(\text{N})}{1600}$$

II.5.2.3. Absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NF EN 1015-18[91], dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de mortier déjà utilisé puis séché. On le pèse(m_0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5 mm d'eau) (figureII.13)et pendant chaque intervalle de temps(15min,30min,1h,2h,4h,24h)on ressort les morceaux du bac et on les pèse(m_1).Le différent de poids entre $m_1$et $m_0$est le poids de l'eau absorbée(m_1- m_0).

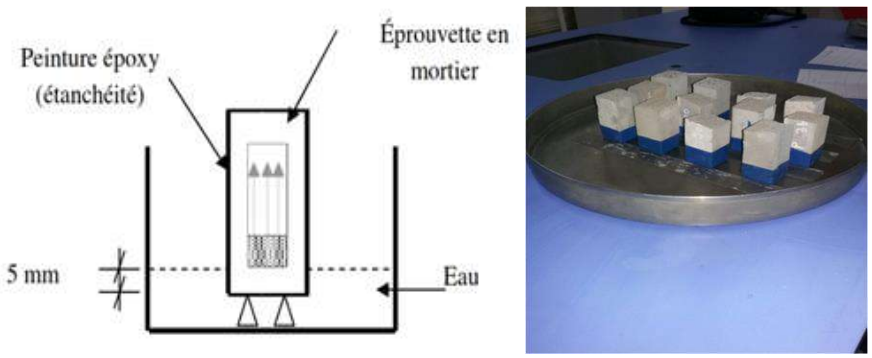


Figure II. 16.Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier

II.5.2.4. Porosité accessible à l'eau

a. Imbibition du corps d'épreuve :

Placer le corps d'épreuve dans un récipient étanche. Une fois le récipient fermé, faire le vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression constante de 25 mbars ; maintenir ce vide pendant au moins 4h. Pour s'assurer que le dégazage des corps d'épreuve est terminé, déconnecter le récipient de la pompe à vide et vérifier à l'aide d'un manomètre que la pression ne remonte pas dans le corps d'épreuve.

Reconnecter le récipient à la lampe à vide et introduire progressivement l'eau d'immersion de façon qu'après 15minutes, le corps d'épreuve soit recouvert d'environ 20 mm d'eau. Maintenir cette pression réduite pendant 20h $\pm$ 1h à 20C°, puis déconnecter la pompe et ouvrir le récipient.

b. Détermination de la masse du corps d'épreuve immergé :

Suspendre le corps d'épreuve à l'aide d'un fil à partir du système de suspension de la balance hydrostatique et le peser complètement immerger dans une certaine quantité d'eau d'immersion contenue dans un bêcher. Mettre le point s'il est utilisé. On obtient ainsi la masse M_{eau} du corps d'épreuve immergé. La pesée doit être effectuée à 0,01 g prés. Déterminer la température de l'eau d'immersion.

c. Détermination de la masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air :

Extraire le corps d'épreuve de l'eau et l'essuyer rapidement et rapidement et soigneusement, à l'aide d'une éponge ou d'une ligne humide, afin de débarrasser des gouttelettes et du film superficiel d'eau, sans toutefois retirer l'eau des pores.

Peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à 0,01 g prés. S'assurer que l'évaporation de l'eau d'imbibition ne provoque pas de perte de masse appréciable pendant les opérations de l'eau de pesées. On obtient, de cette manière, la masse M_{air} du corps d'épreuve imbibé.

d. Détermination de la masse du corps d'épreuve sec :

Sécher le corps d'épreuve à 105 ± 5C° jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après un séjour de 24 h à l'étuve, ne différent pas de plus de 0,05 %.

Avant chaque pesée, placer l'éprouvette dans un dessiccateur jusqu'à ce qu'elle atteigne la température ambiante. Les pesées doivent être effectuées à 0,05 g prés.

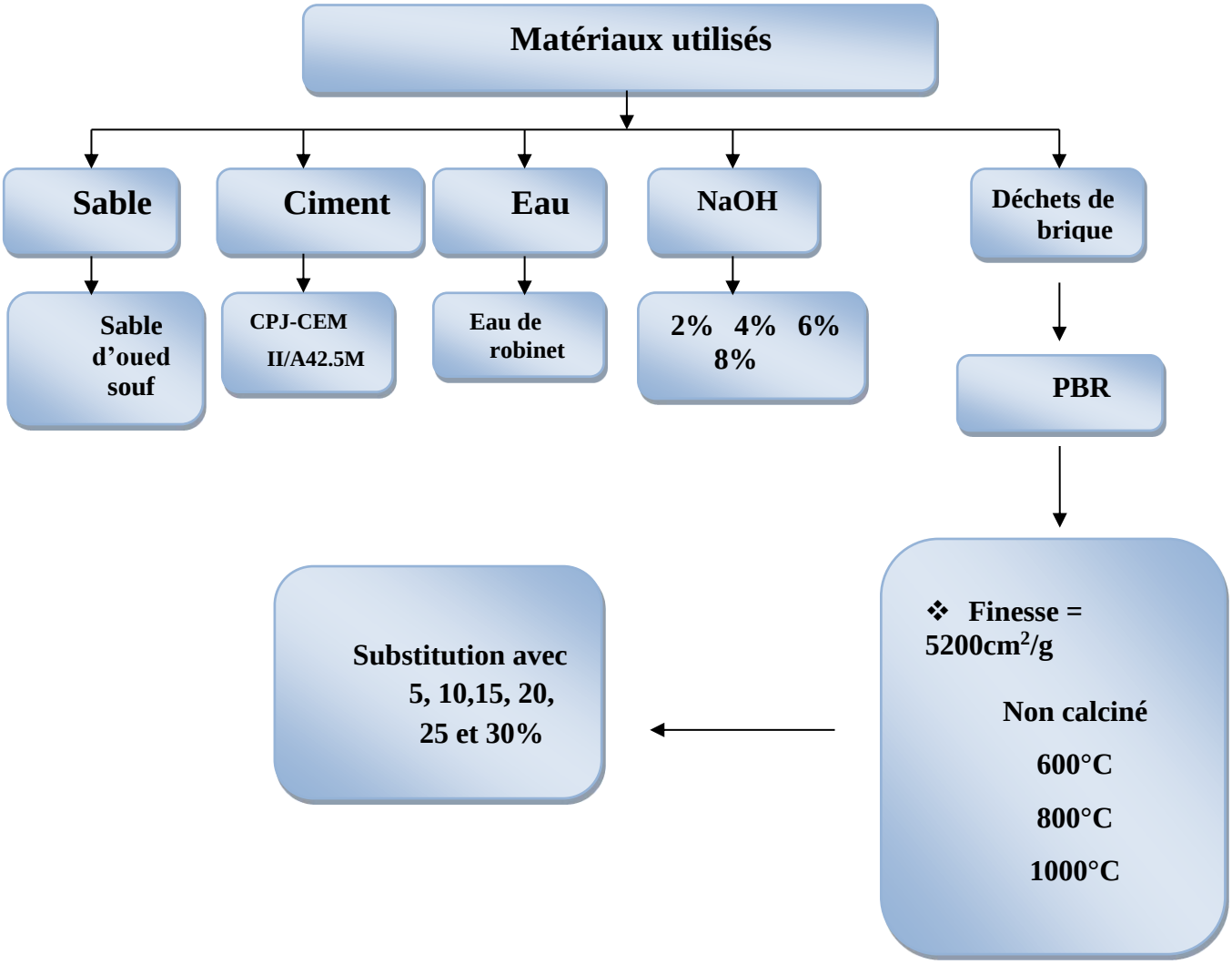
La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche (M_{sec})

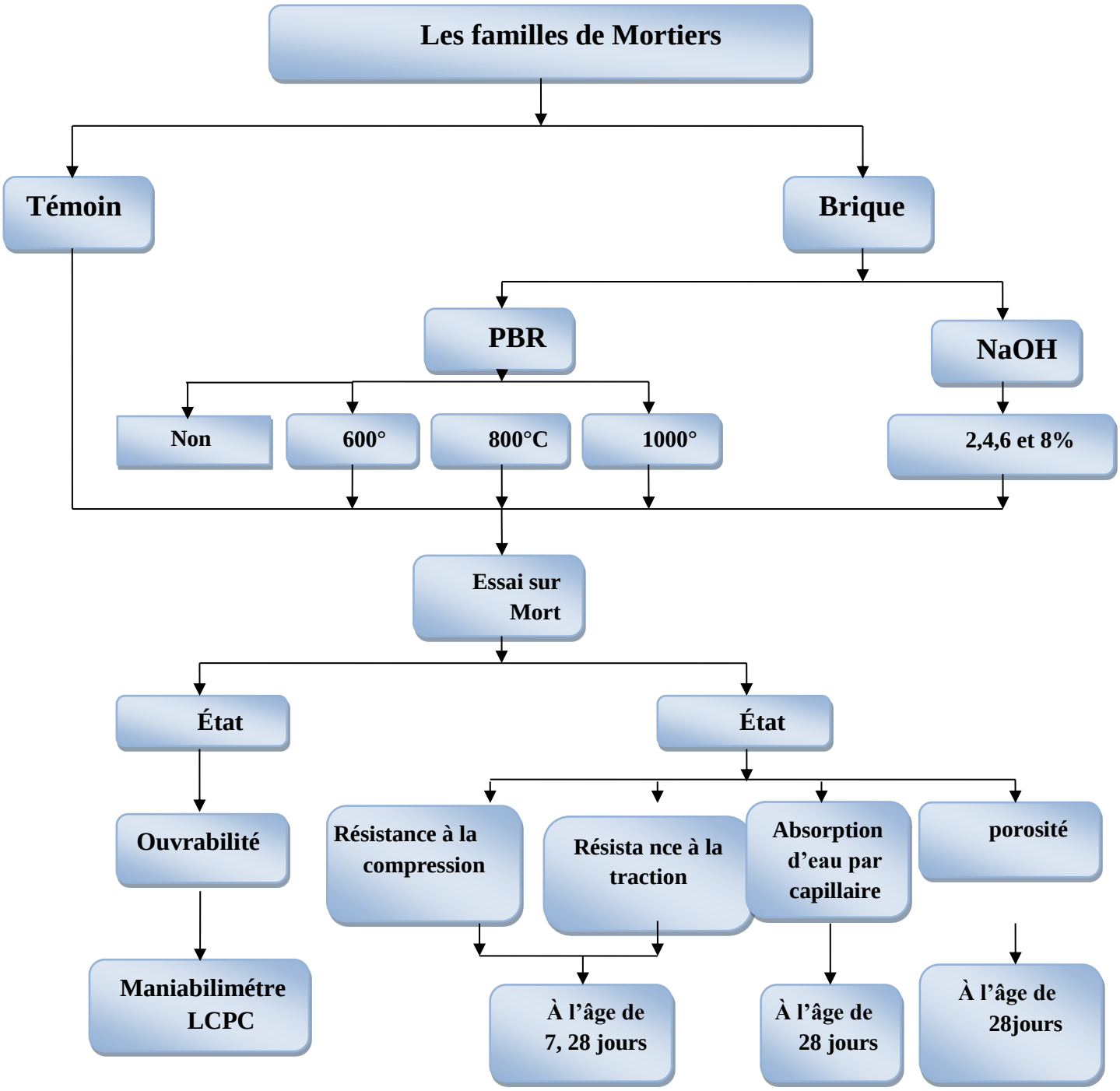
La porosité accessible à l'eau, ε,exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation**[92]** : **Livre GRAN Dubé 383-384**

$$\varepsilon\% = \frac{\text{Mair} - \text{Msec}}{\text{Mair} - \text{Meau}} \text{X}100 \qquad \text{Eq.2.2}$$



Figure II. 17. Essai de porosité sur mortier


Matériaux utilisés
Sable
Ciment
Eau
NaOH
Déchets de brique
Sable d'oued souf
CPJ-CEM II/A42.5M
Eau de robinet
2% 4% 6% 8%
PBR
❖ Finesse = 5200cm²/g
Non calciné
600°C
800°C
1000°C
Substitution avec 5, 10,15, 20, 25 et 30%



CONCLUSION

Dans notre travail on a réalisé des essais importants pour déterminer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques. Tout dans le but de connaitre l'effet de calcination des déchets de brique sur le Mortier ordinaire. Le protocole expérimental utilisé nous a donné des résultats exprimés au chapitre III.

CHAPITRE III : ANALYSE ET DISCUTIONS DES RÉSULTATS

III.1. Introduction

L'objectif de l'étude expérimental est d'étudier l'effet de recyclage de déchet de briques cuites sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des mortiers ordinaires base des matériaux locaux.

A cet effet, nous visons à tester les différents mortiers réalisés par l'essai d'ouvrabilité à l'état frais. Ainsi la caractérisation des différents mortiers à l'état durci à travers l'essai de traction par flexion, l'essai de compression, l'absorption d'eau et la porosité, en fonction du pourcentage de substitution de déchet.

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude sont présentés et discutés ci-après

III.2. Essais sur mortier à base de déchets

III.2.1 État frais

- **Maniabilité des mortiers :**

Les résultats de maniabilité sont présentés sur un histogramme (FigureIII.1) qui permet de comparer les valeurs du temps d'écoulement des différents mortiers à base de déchets de brique au mortier normalisé; la maniabilité est élaborée par l'essai de maniabilimétre LCPC

Tableau III. 1.Résultats d'essais à l'état frais de différentes familles de mortier

Temps d'écoulement (S)					
(%)	Non calciné	600°C	800°C	1000°C	MT
5	2	2	3	4	2
10	2	2,15	3	4	
15	2,5	2,5	3,5	4	
20	3	3	3	4,5	
25	3	3	3,5	4,5	
30	3	3	4	4,5	

Le tableau ci-dessus présente la variation de la maniabilité des mortiers normalisés, on constate que plus on augmente la température et le temps de calcination, plus la maniabilité diminue, avec une augmentation importante de temps d'écoulement, le but de cet essai est de garder la maniabilité constante comprise entre un intervalle de [2 ; 5] secondes.

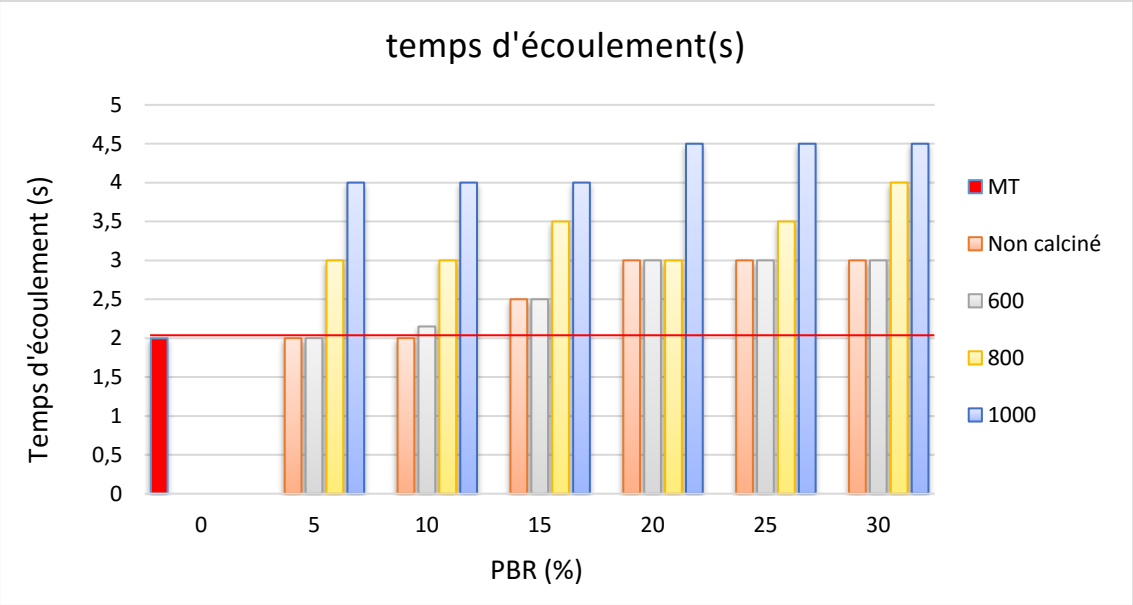


Figure III. 1.Temps d'écoulement en fonction du pourcentage de PBR

D'après l'histogramme représenté dans la figure III. 1, on remarque que les déchets de brique influent négativement sur l'ouvrabilité des mortiers, on a trouvé une relation inversement proportionnelle entre le pourcentage des déchets et la maniabilité des mortiers.

Qui confirme les résultats trouvé par Aouni M[37], Irki et al ont révélés une diminution des paramètres rhéologiques des mortiers autoplaçants à base de déchets de briques [34]. Cette diminution en ouvrabilité est semblée être due au taux d'absorption élevé des déchets de brique. En plus de la forme irrégulière de ses grains.[38].

Cette diminution de la maniabilité est due à la demande en eau plus grande du métakaolin. Plusieurs auteurs ont travaillé sur la demande en eau des métakaolins dans des pâtes, mortiers et bétons en concluant toujours que la demande en eau augmentait avec la quantité de métakaolin introduite .[39, 40]

➢ **Maniabilité du mortier sous l'effet de NaOH**

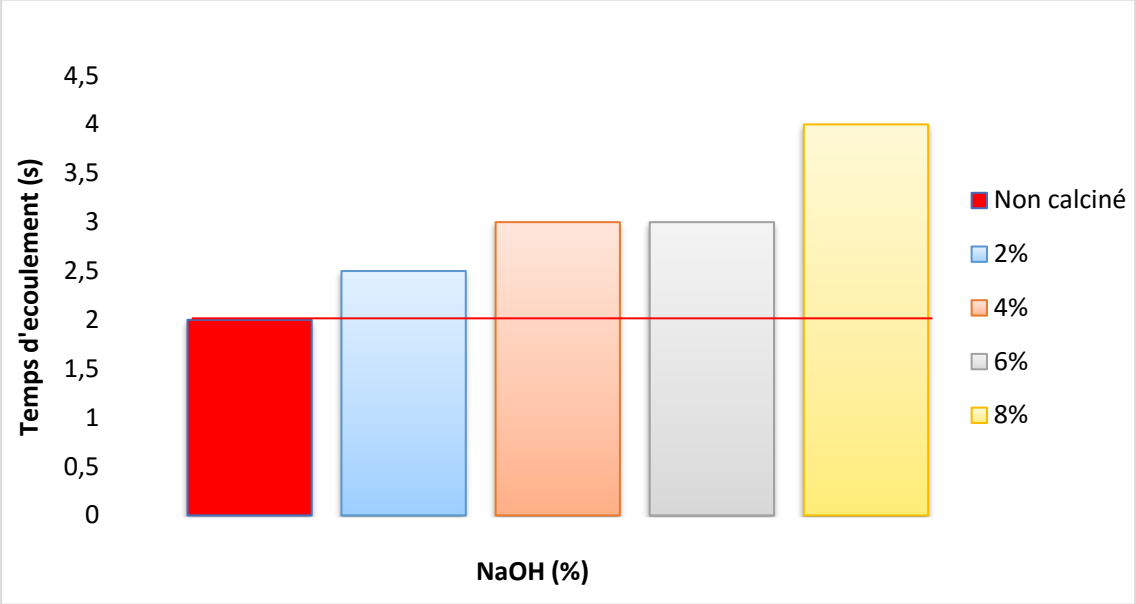


Figure III. 2.Temps d'écoulement en fonction du pourcentage du NaOH

D'après les résultats expérimentaux présentés précédemment, l'introduction du NaOH affecte la maniabilité des mortiers frais. Ces résultats confirment que la PBR calcinée absorbe plus d'eau que le PBR (NC) témoin[46]. Aussi, un pourcentage plus élevé du NaOH présente un temps plus augment, ce qui confirme que le NaOH est un activateur de prise[74, 93]

Ce qui confirme les résultats réalisé par Torgal et al [53] qui ont montré que la maniabilité du mortier diminue avec l'augmentation de la concentration de l'hydroxyde de sodium (NaOH).

III.2.2. État durci

III.2.2.1. Influence de la poudre de brique recyclé

A. Résistances mécanique

Pour les différentes familles de mortier ordinaire, les mesures ont été réalisées sur éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm^3. Les résultats de l'essai de résistance effectué sur les différents mortiers ordinaires à base de poudre de brique aux échéances 7 et 28 jours sont présentés dans cette partie.

A.1.Résistance à la compression

Pour mieux saisir le sens de l'évolution relative de la résistance à la compression des différents mortiers avec l'âge et fonction du taux de substitution de PBR, et permettre la comparaison avec le MT, les résultats sont présentés dans les figures III.3 et III.4

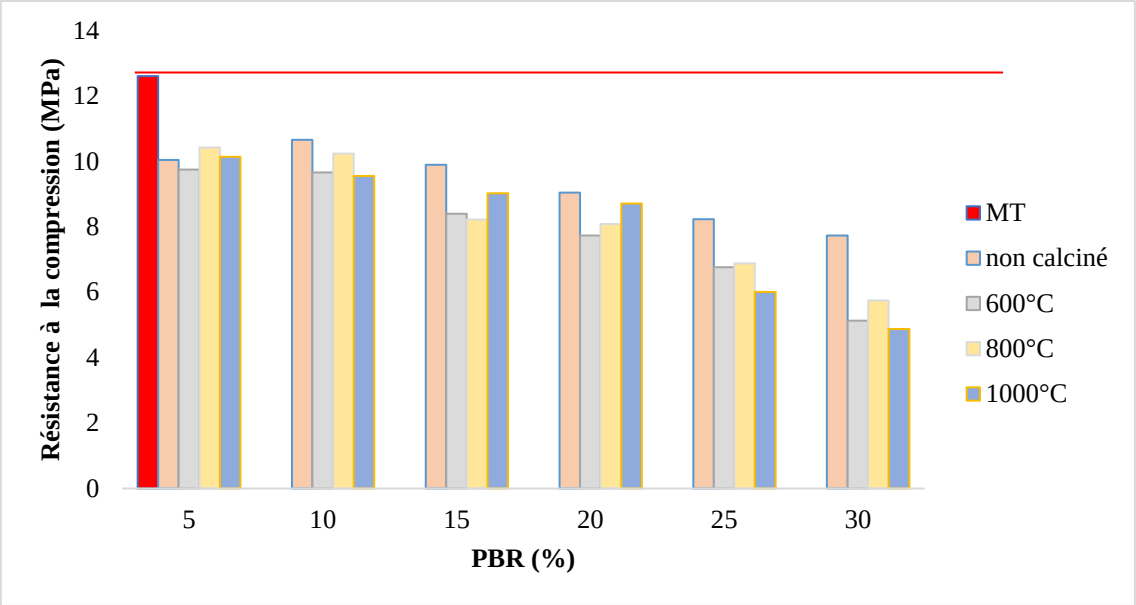


Figure III. 3. La résistance à la compression en fonction de substitution de PBR à 07 jours

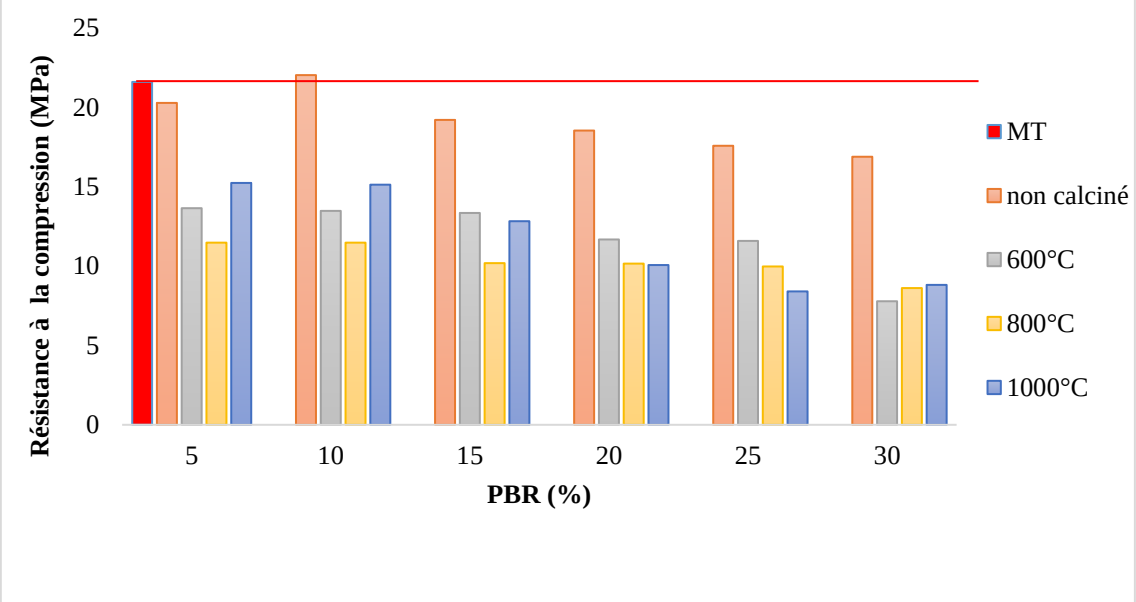


Figure III. 4. La résistance à la compression en fonction de substitution de PBR à 28 jours

La première remarque qui doit être soulignée à travers ces figures, qu'à jeune âge les résistances des mortiers à base de déchet de brique diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en déchet. La résistance à la compression varie entre 15% et 61 % à 7 jours. En outre les mortiers réagissent différemment à 28 jours. Certains mortiers ont une amélioration de 02% avec un taux de substitution de 10% de ciment par la poudre de brique non calcinée ; les autres mortiers ont une diminution de résistance variant de 29 à 63%. La calcination de la poudre de brique à un effet négatif sur les résistances mécaniques.

La figure montre aussi que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute. Cette évolution de résistance nous permis de conclure l'effet pouzzolanique des déchets de briques après 28 jours de cure ; a jeune âge, la poudre de

brique peut jouer remplir les éventuels vides à l'intérieur de la matrice cimentaire, mais elle ne développe plus la résistance, en outre l'effet bénéfique des poudres de briques est atteint après 28 jours de cure. Ces résultats sont en concordance avec Aouni et al. Et Ouzadid.S et al. Ces derniers ont utilisé la poudre de brique dans un mortier autoplaçant. [33, 37] Le comportement des mortiers à base des déchets de briques est le même que les mortiers à base de la pouzzolane naturelle.

Benkaddour et al [21]dans leur études ont trouvé que la résistance en compression diminue considérablement avec l'augmentation de la pouzzolane naturel de BENI SAF a jeune âge et augmente à long terme (après les 28 jours de cure)

La meilleure résistance observée correspondant au mortier à base de poudre de brique non calciné utilisé avec pourcentage de 10%.

A travers ce résultat, on a essayé de traiter ce mortier optimum par un activateur alcalin (NaOH) avec différents pourcentages variant de 2 jusqu'au 8% avec un pas de 2% ;

la figure III.5 présente cette variation de résistance.

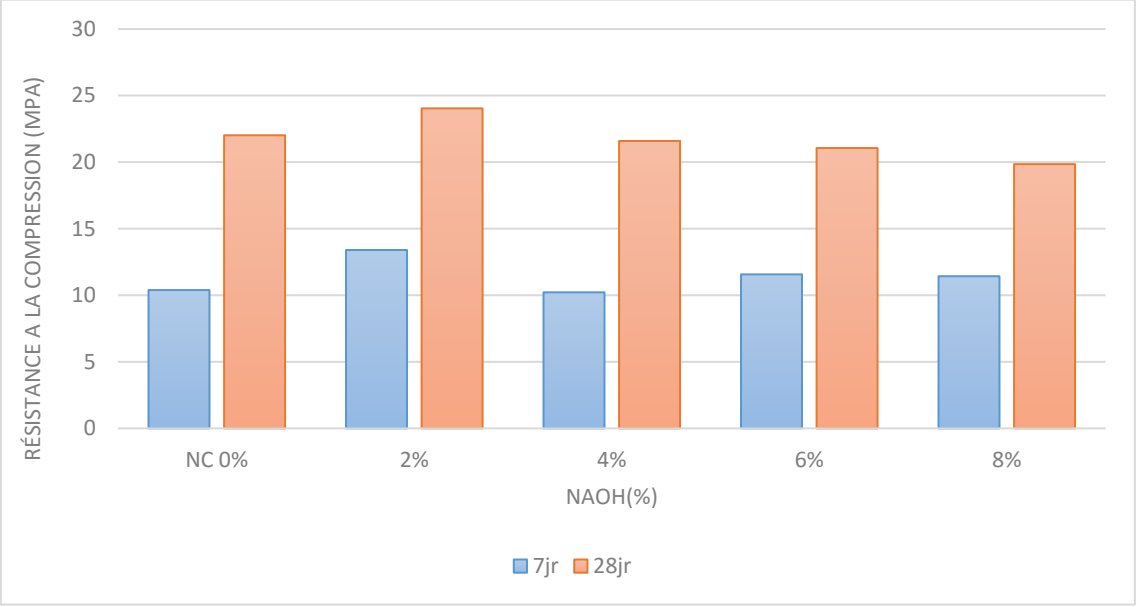


Figure III. 5. La résistance à la compression en fonction de % du NaOH

Les figure 3.5 représente les résultats de la compression de mortier non calciné en ajoutant de l'activant chimique avec des pourcentages de2%,4%,6% et 8%. On constate que si on utilise le NaOH avec un pourcentage de 2%, la résistance est améliorée de 29% à 7 jours et de 09 % à 28 jours. Le NaOH joue donc le rôle d'un catalyseur à jeun âge et développe une résistance importante par rapport au mortier sans NaOH. Après 28 jours l'effet du NaOH est quasiment absent. Somna et al [59]a montré que l'augmentation de la concentration du NaOH entraine une augmentation de résistance de compression de la pâte .

Au-delà de cette valeur (NaOH ≥ 2%) la résistance des mortiers diminue ; En présence de l'eau il y'a formation d'un sel expansif inactif (Na-CH), permettant de laisser plus de vide à l'intérieur de la matrice cimentaire, qui peut causer la diminution de la compacité et par conséquence la diminution de la résistance. Ce qui confirme les résultats de Babaali.N et al[46].

A.2 Résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence Ciment-Granulats. Pour mieux saisir le sens de l'évolution relative de la résistance à la traction par flexion des différents mortiers ordinaire avec l'âge et fonction du taux de substitution de PBR, et permettre la comparaison avec les MT, les résultats sont présentés dans les figures III.6. III.7

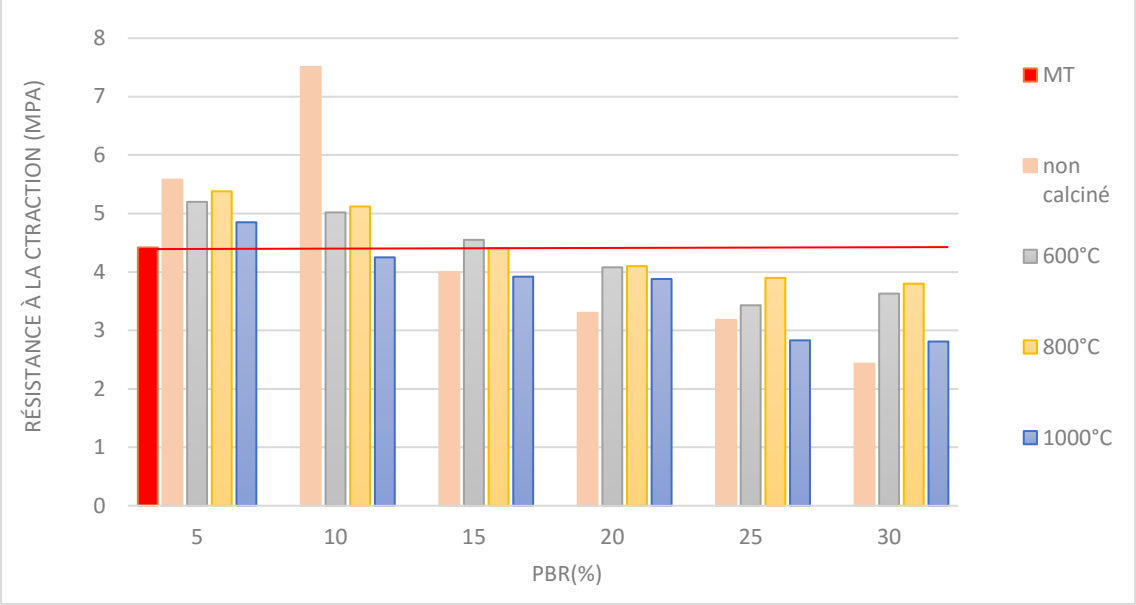


Figure III. 6. La résistance à la traction en fonction de substitution de PBR à 7jrs

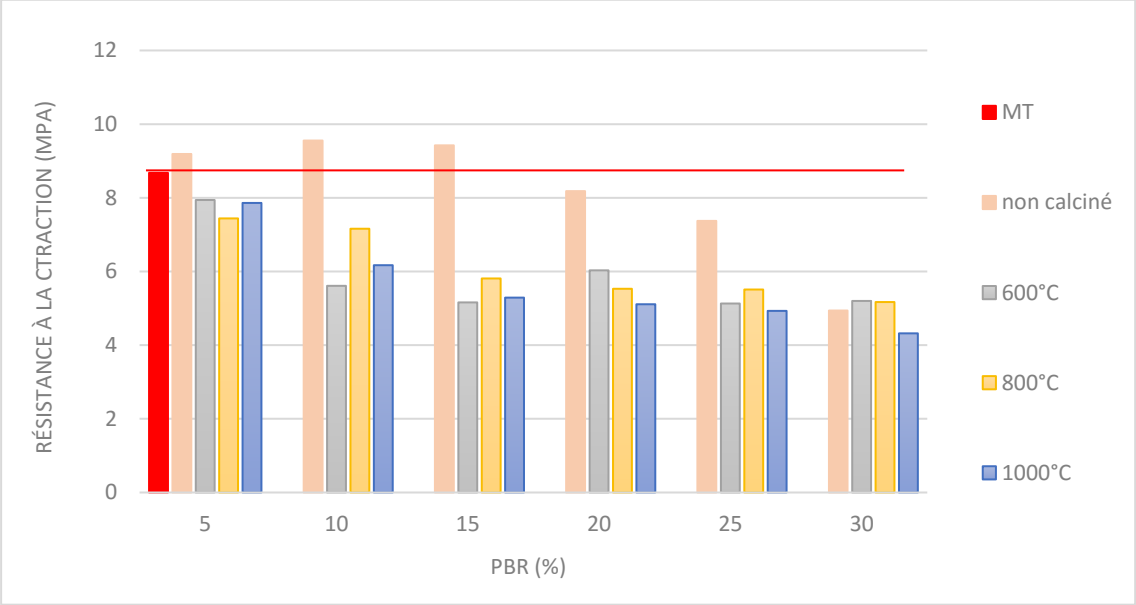


Figure III. 7. La résistance à la traction en fonction de substitution de PBR à 28 JRS

D'après la figure III.6 et III.7, On remarque que les résistances à la traction augmentent en fonction de l'âge quel que soit le type du mortier. Ceci est dû au développement de l'hydratation

de ciment en fonction du temps. La meilleure résistance observée correspond au mortier avec (10%) de PBR non calciné. Cette augmentation de résistance est estimée de 10% à 28 jours.

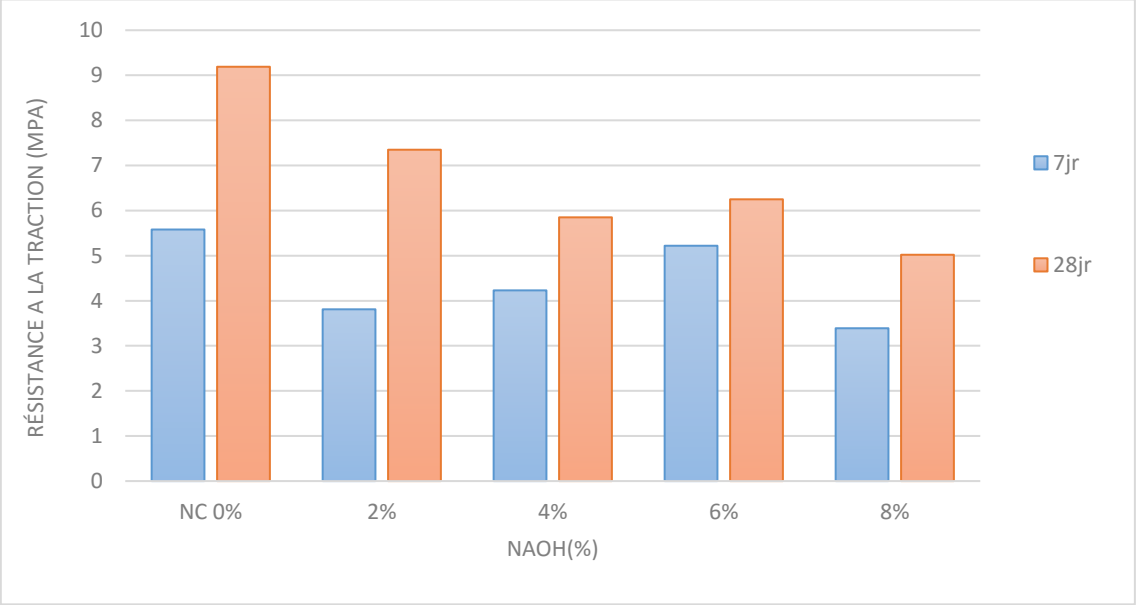


Figure III. 8. La résistance à la traction en fonction de % du NaOH

La figure III.8 représente les résultats de la traction par flexion des mortiers non calcinés en ajoutant de l'activant alcalin avec des pourcentages de2%,4%,6% et 8%. On constate que plus on augmente le pourcentage du NaOH, la résistance diminue cette variation varie de 7 à 39% à l'Age de 7 jours et de 20% à 45% à l'Age de 28 jours. La réduction de la compacité causée par la formation du sel Na-CH est la principale cause de cette réduction.

B. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité des différents mortiers réalisés sont résumés dans Les figureIII.9, III.10, III.11 et III.12.

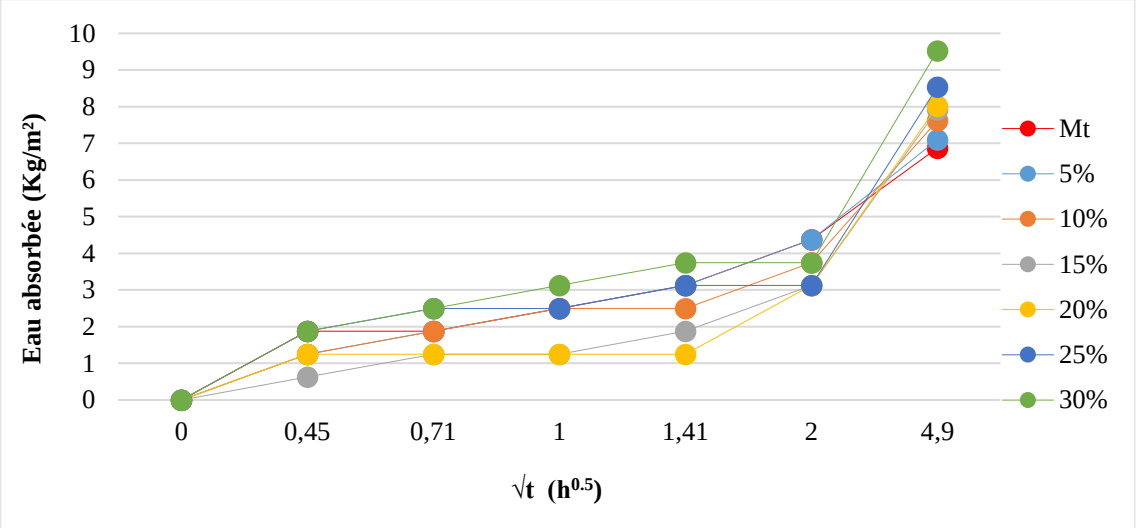


Figure III. 9: L'absorption d'eau par capillarité du PBR 600°C

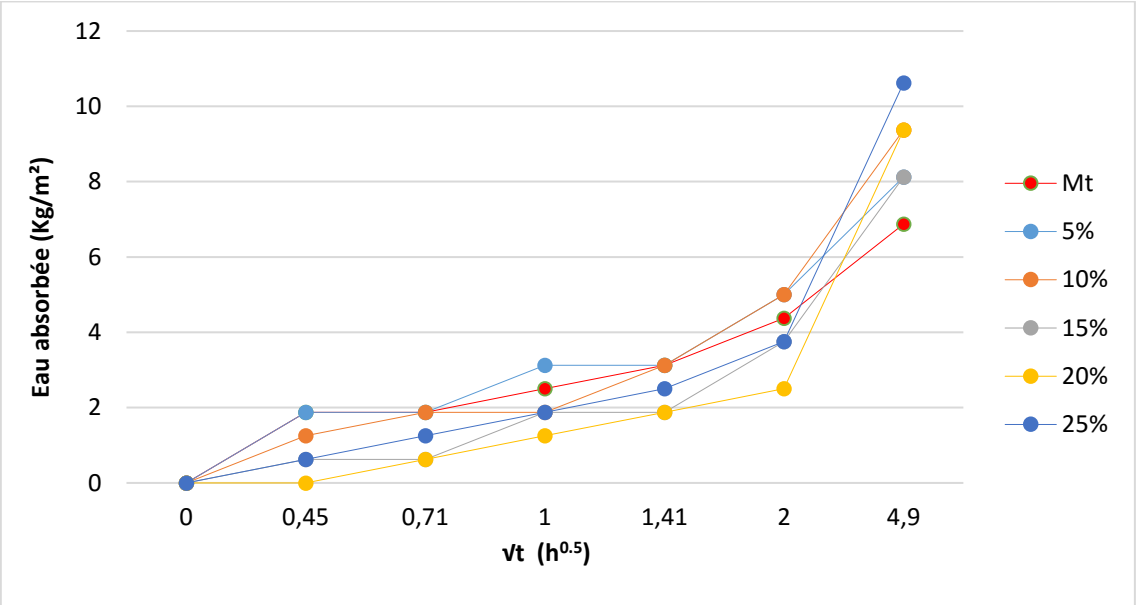


Figure III. 10: L'absorption d'eau en fonction du temps du PBR 800°C

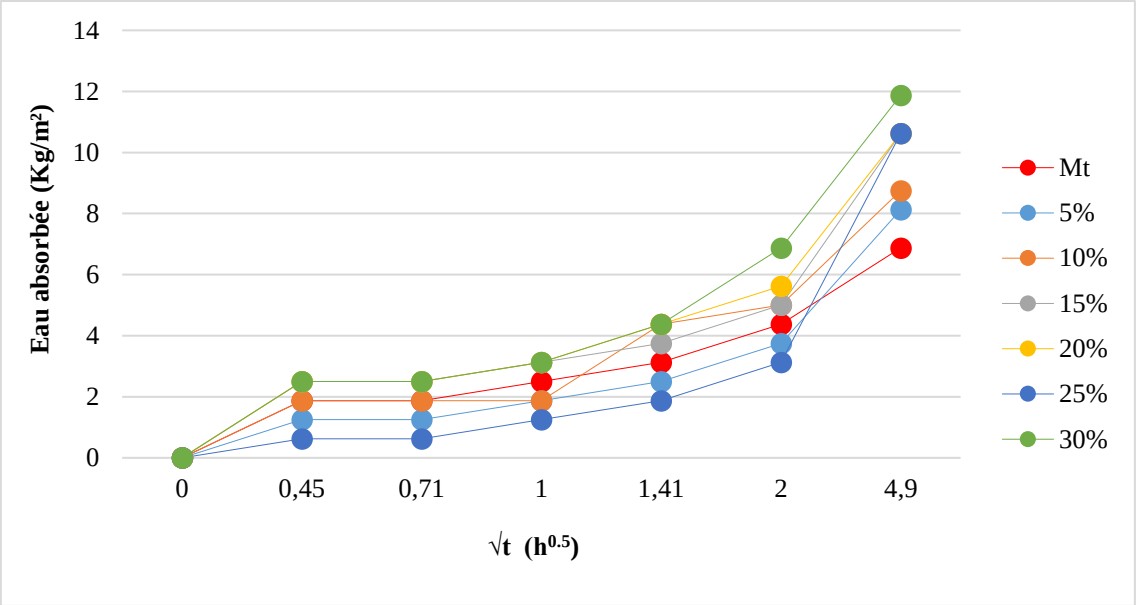


Figure III. 11: L'absorption d'eau en fonction du temps du PBR 1000°C

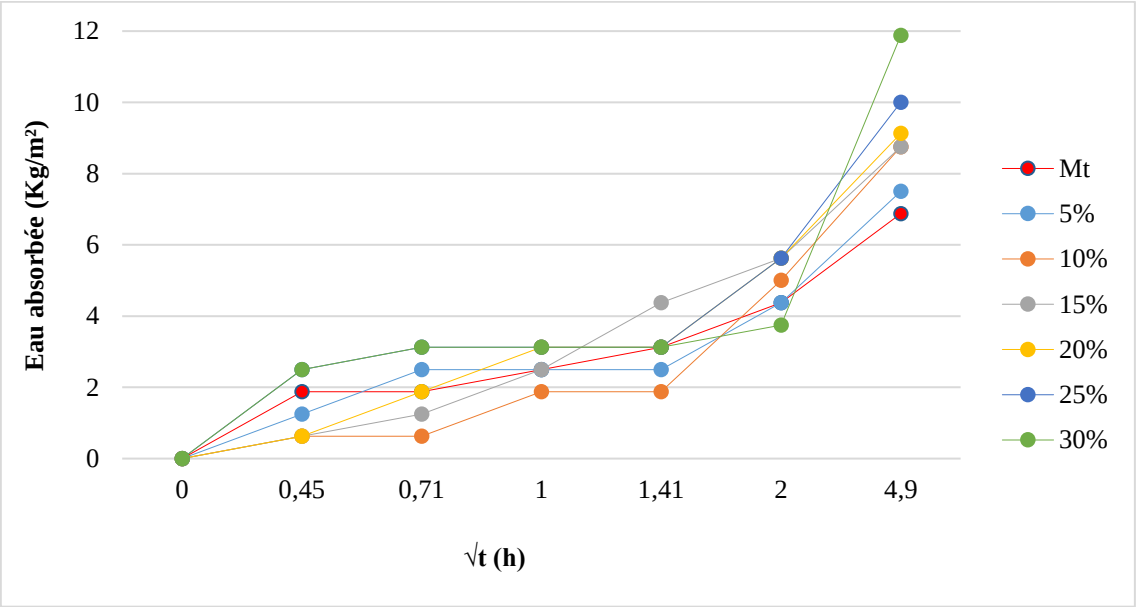


Figure III. 12: L'absorption d'eau en fonction du temps du PBR non calciné

D'après les figures précédentes, on constate que plus on augmente la substitution en PBR plus l'absorption augmente pour toutes les familles ce qui confirme par Babaali.N[46].

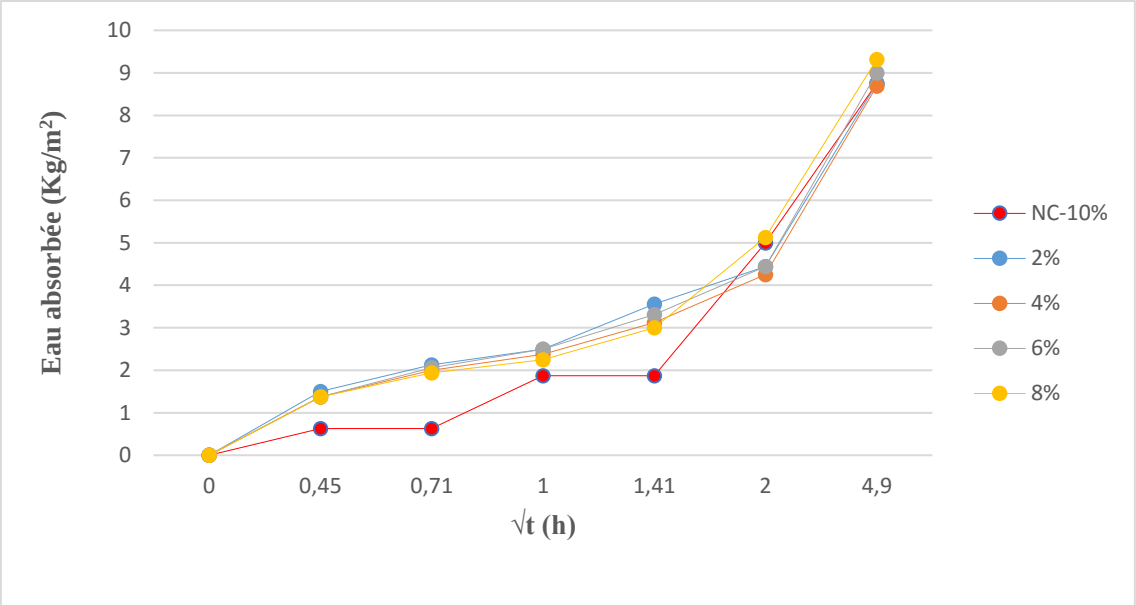


Figure III. 13: L'absorption d'eau en fonction du temps et pourcentage du NaOH

La figure III.13 représente les résultats de l'absorption d'eau par capillarité du mortier non calciné en ajoutant de l'activant chimique avec des pourcentages de2%,4%,6% et 8%. on constate que pour les tous les mélanges du PBR non calciné avec différents pourcentages du NaOH, présentent un taux d'absorption plus élevé que celui du mortier témoin (NC). En présence de l'eau il y'a formation d'un sel expansif inactif (Na-CH), permettant de laisser plus de vide à l'intérieur de la matrice cimentaire, après durcissement et séchage des éprouvettes à l'absorption capillaire des mortiers augmente.[46]

C. Porosité Accessible à L'eau

L'étude de la porosité des mortiers confectionnés, est un paramètre très essentiel pour l'évaluation de la résistance et de la compacité des mélanges, dont il y'a une relation directe entre eux. Les résultats de la porosité sont calculés selon la recommandation AFREM [94]

Les résultats de la porosité accessible pour tous les mélanges en fonction de la température de calcination et pourcentage de PBR, sont présentés à la figure III.14.

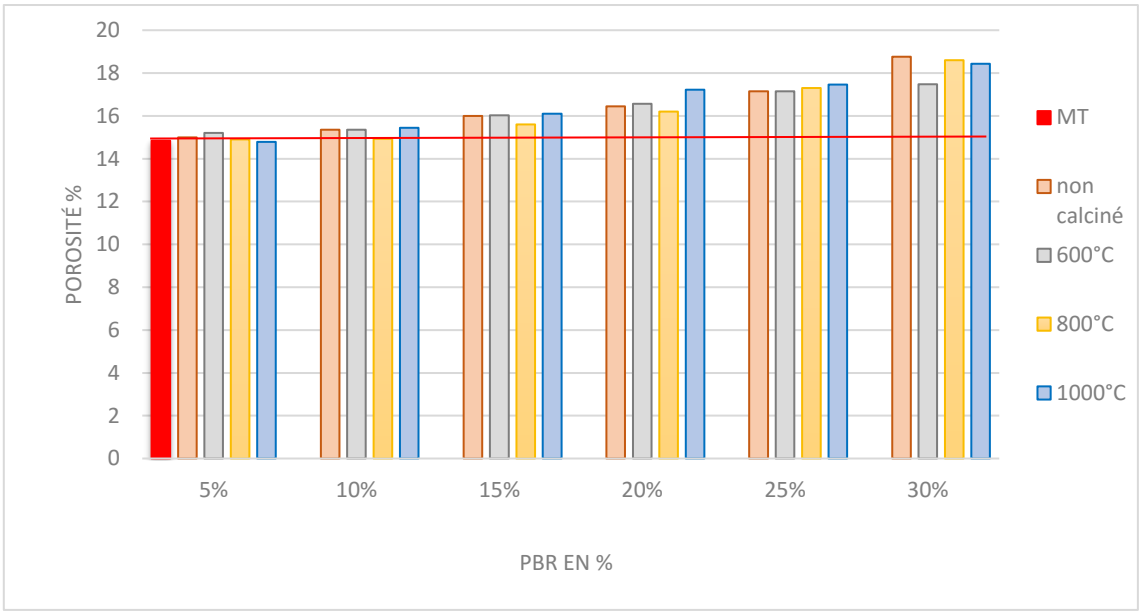


Figure III. 14: Porosité accessible à l'eau en fonction de % du PBR

Dans les conditions standard, et si on compare les différents mélanges, on peut observer de cette figure que le mélange le plus poreux est celui de 800°C.

Apres durcissement et séchage des éprouvettes la porosité des mortiers augmente, cette réduction de la compacité de 1 à 60% pour tous les mortiers.

On remarque que le mortier de PBR non calciné présente la moindre valeur de la porosité Par rapport les autres mélanges, et présente une similarité par rapport au mortier témoin.

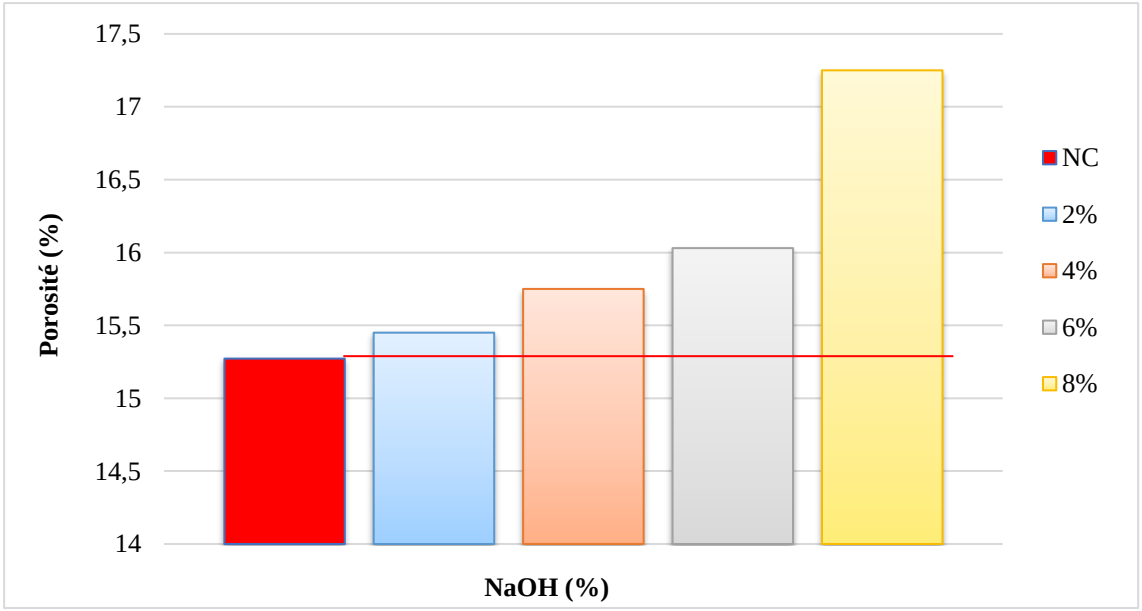


Figure III. 15. Porosité accessible à l'eau de mortier a base du PBR

Non calciné en de % de NaOH

En comparaison avec le mortier M-NC-10%, les différents mélanges avec 2%,4% 6% et 8% de NaOH, présentent une augmentation de la porosité avec l'augmentation de la teneur en NaOH, en présence de l'eau il y a formation d'un sel expansif inerte (Na-CH) qui permettant de laisser plus de vides à l'intérieur de la matrice cimentaire, après durcissement et séchage des éprouvettes la porosité des mortiers augmente de 1 à 13%

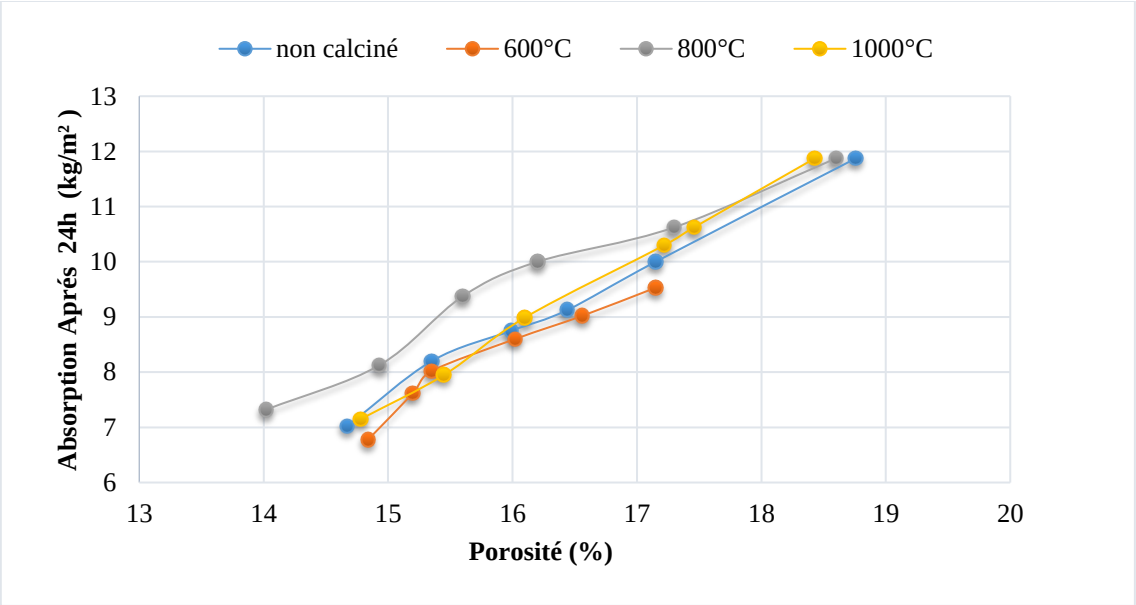


Figure III. 16 . Corrélation entre l'absorption d'eau et la porosité

La porosité et l'absorption capillaire, ont une variation proportionnelle entre eux ce qui confirme une diminution de la compacité des mélanges et par conséquence augmentation de la porosité.

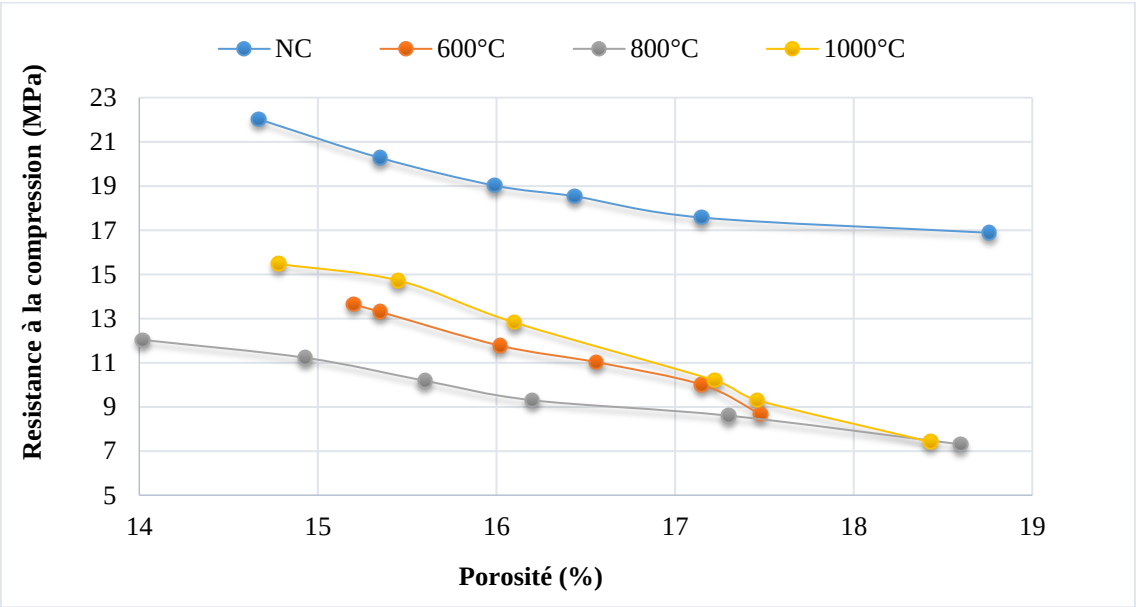


Figure III. 17. Corrélation entre la résistance et la porosité.

La diminution de la compacité des mélanges à base de briques cuite, cause principalement la diminution de la résistance à la compression, cette dernière est confirmée par les résultats illustrés sur les graphes des figures III.17et III .18, en corrélation de la résistance mécanique avec la porosité, on constate qu'il y a une variation inversement proportionnelle entre les deux paramètres ; la diminution de la compacité induit une réduction de la résistance à la compression.

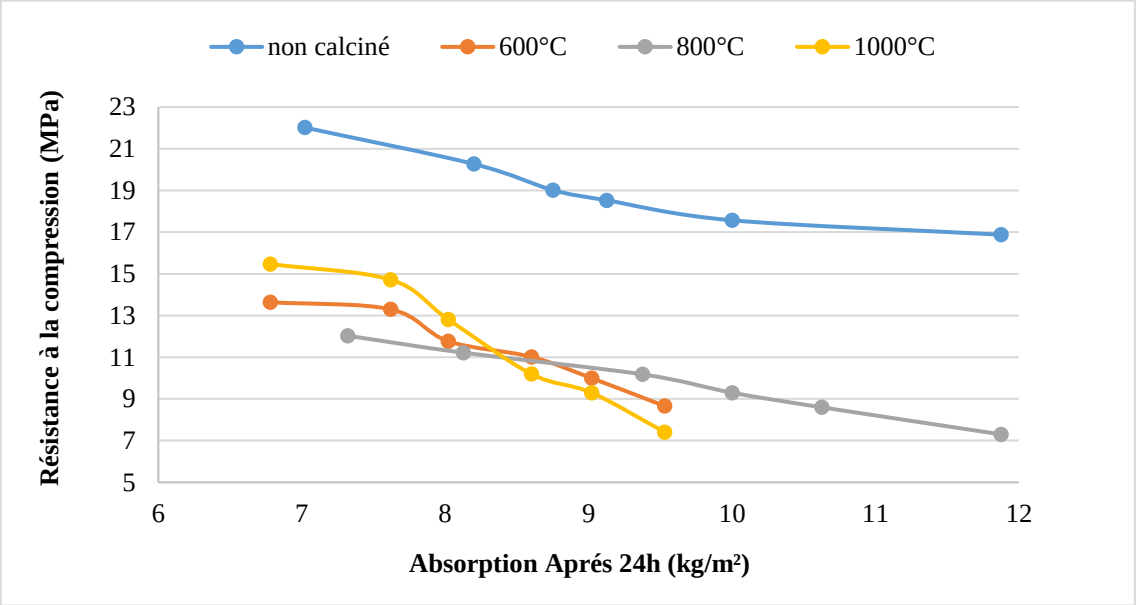


Figure III. 18 : relation entre la résistance et l'absorption d'eau

De même la résistance mécanique diminue en fonction de l'augmentation de l'absorption d'eau par capillarité, on constate qu'il y a une variation inversement proportionnelle entre les deux paramètres.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

ET RECOMMANDATION

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de déterminer l'influence de déférents pourcentages de PBR, températures de calcination et de pourcentages du NaOH sur le comportement des mortiers.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus on peut tirer les conclusions suivantes :

Effet de la poudre de brique

A l'état frais :

- La poudre de brique influent négativement sur la maniabilité des mortiers en fonction de l'augmentation du taux de substitutions pour toutes les familles

A l'état durci :

- Les résistances à la compression de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute
- À jeune âge les résistances à la compression des mortiers à base de déchet de brique diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en déchet.
- A jeune âge, la poudre de brique peut jouer remplir les éventuels vides à l'intérieur de la matrice cimentaire, mais elle ne développe plus la résistance
- Une amélioration avec un taux de substitution de 10% de ciment par la poudre de brique non calciné a 28 jours.
- L'effet pouzzolanique des déchets de briques après 28 jours de cure.
- La meilleure résistance à la compression observée correspondant au mortier à base de poudre de brique non calciné utilisé avec pourcentage de 10%.
- Les résistances à la traction augmentent en fonction de l'âge quel que soit le type du mortier.
- La meilleure résistance observée correspond au mortier avec (10%) de PBR non calciné.
- L'ajout de la PBR augmente le taux d'absorption par capillarité.
- La porosité des mortiers augmente,
- Le mortier de PBR non calciné présente la moindre valeur de la porosité Par rapport les autres mélanges, et présente une similarité par rapport au mortier témoin.

Effet de la poudre de brique non calciné avec l'ajout de pourcentage du NaOH

À l'état frais :

- On remarque que la concentration de NaOH influent négativement sur l'ouvrabilité des mortiers.
- Un pourcentage plus élevé du NaOH présente un temps plus augment, ce qui confirme que le NaOH est un activateur de prise.

A L'état durci :

- L’utilisation de NaOH avec un pourcentage de 2%améliore la résistance a la compression.
- Au-delà de valeur de pourcentage d’hydroxyde de sodium (NaOH ≥ 2%) la résistance à la compression des mortiers diminue.
- Le NaOH joue le rôle d’un catalyseur à jeun âge et développe une résistance importante par rapport au mortier sans NaOH.
- Une concentration du NaOH élevée, la résistance diminue
- Tous les mélanges du PBR non calciné avec différents pourcentages du NaOH, présentent un taux d'absorption plus élevé que celui du mortier témoin (NC).
- Une augmentation de la porosité avec l’augmentation de la teneur en NaOH.

Recommandations

D’après les résultats trouvés ci-dessus, on recommande quelques points pour les futurs projets de recherches :

- Etudier l’effet du temps de calcination à partir de 1 heures et 2 heures.
- Etudier l’effet de l’utilisation d’autres activant chimiques.
- Etudier les combinaisons des additions contenant un taux élevé de SiO2.
- Confirmer les résultats de résistances mécaniques par les essais approfondis.
- Utiliser plusieurs supports pour connaitre le comportement réel des déchets des briques, à savoir le béton autoplaçants et les bétons a haute performances.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. *Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement. Janvier 2002.*
2. *Duan, Z.H. and C.S. Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. Materials & Design, 2014. 58: p. 19-29.*
3. *Kenai, S. and F. Debieb, Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés. Materials and structures, 2011. 44(4): p. 815-824.*
4. *Mahdi, F., H. Abbas, and A. Khan, Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. Construction and Building Materials, 2010. 24(1): p. 25-36.*
5. *BOUKENDAKDJI, O., ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN BÉTONAUTOPLAÇANT :OPTIMISATION DES CONDITIONS OPÉRATOIRES;THESE DE DOCTORAT D'ETAT Spécialité : Génie Civil;UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA. 2010.*
6. *Li, Z. and Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. Cement and Concrete Research, 2003. 33(4): p. 579-584.*
7. *Amrane, A. and S. Kenai, Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud. Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud, 1994: p. 106-122.*
8. *Bougara, A., C. Lynsdale, and K. Ezziane, Activation of Algerian slag in mortars. Construction and Building Materials, 2009. 23(1): p. 542-547.*
9. *Khatib, J. and J. Hibbert, Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. Construction and building materials, 2005. 19(6): p. 460-472.*
10. *M, B., et al., "Etude d'un nouveau ciment à base de Laitier granulé d'El-Hadjar (Algérie)" Annales du Bâtiment et des Travaux Publics,. Avril 2004,: p. 21-29.*
11. *Borsoi, A., et al. Low-heat, high-strength, durable self-consolidating concretes. in Proceedings of 9th CANMET/ACI International Conference Recent Advances in Concrete Technology, Warsaw, Poland. 2007.*
12. *Oner, A. and S. Akyuz, An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. Cement and Concrete Composites, 2007. 29(6): p. 505-514.*
13. *Chidiac, S. and D. Panesar, Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days. Cement and Concrete Composites, 2008. 30(2): p. 63-71.*
14. *O'Rourke, B., C. McNally, and M.G. Richardson, Development of calcium sulfate–ggbs–Portland cement binders. Construction and Building Materials, 2009. 23(1): p. 340-346.*
15. *Naceri, A. and I. Messaoudene, Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier. Lebanese Science Journal, 2006. 7(2): p. 85-96.*
16. *Felekoğlu, B., S. Türkel, and B. Baradan, Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Building and Environment, 2007. 42(4): p. 1795-1802.*
17. *Klug, Y. and K. Holschemacher. Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. in 3rd RILEM symposium on self compacting concrete, Reykjavik. 2003. RILEM Bagneux, France.*
18. *Domone, P., A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. Cement and concrete composites, 2007. 29(1): p. 1-12.*
19. *Toufik, B., Evaluation des Performances Des Ciments Portland au Calcaire-Exemple de la cimenterie de Chlef. 2009, Université de Chlef-Hassiba Benbouali.*
20. *Souhil, O. and L. Kheireddine, l'effet de la pozzolane naturelle sur la formulation des béton a haute performances Juin 2016.*
21. *Benkaddour, M., F.K. Aoual, and A. Semcha, Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. Nature & Technology, 2009(1): p. 63.*
22. *TECHNIQUE DE L'INGENIEUR ., Doc. C3370. 1989-1991.*

23. *C, A. and H. H, Les performances des mortiers avec différentes additions minérales, 1st International Conference on SustainableBuiltEnvironment Infrastructure in Developing in Developing Countries ENSET Oran, Algérie. 2009,.*
24. *l., A., " Matériaux de Terre Cuite " ; Techniques de l'Ingénieur 1994.*
25. *R, D., "Éléments de Construction Bâtiment", Edition Delagrave. 1990.*
26. *Saadani, S., Comportement des bétons à base de granulats recyclés.*
27. *HaboubH and BelaichaM, Introduction du sable de déchet de marbre dans le béton hydraulique, thèse de magister université de Skikda, Algérie. 2010.*
28. *Chaid, R., et al., Effet des déchets de marbre sur la durabilité des bétons en milieu marin.*
29. *Xie, Z. and Y. Xi, Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement. Materials and Structures, 2002. 35(8): p. 510-515.*
30. *Zeroub, H., Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale). 2012, Université de Boumerdès-M'hamed Bougara.*
31. *Chakchouk, A., et al., Formulation of blended cement: Effect of process variables on clay pozzolanic activity. Construction and building materials, 2009. 23(3): p. 1365-1373.*
32. *Nigri, G.R., et al., Metaanalysis of trials comparing minimally invasive and open distal pancreatectomies. Surgical endoscopy, 2011. 25(5): p. 1642-1651.*
33. *Ouzadid, S. and H. Larouci Dilmi, Etude des proprietés physico-mécanique et la durabilité de mortier autoplaçant à base des granulats de brique cuite 2016.*
34. *Irki, I., et al., Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar. Journal of adhesion science and Technology, 2018. 32(9): p. 963-975.*
35. *Bourema, M., Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci.Université de 20 Aout 1955-Skikda. 2015.*
36. *ABDEREZZAK, B., « valorisatioon des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton ».Magister en génie civil Filière : Aménagement Hydraulique et Génie.*
37. *Meriem, A. and M. Asma, VALORISATION DE LA POUDRERECYCLÉE DANS LE MORTIER DECIMENT(poudre de brique et du béton). Juin 2014.*
38. *N., B., Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques,thèse de magister, Université de Constantine, Algérie. 2004.*
39. *He, C., B. Osbaeck, and E. Makovicky, Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. Cement and concrete research, 1995. 25(8): p. 1691-1702.*
40. *Bai, J., et al., Strength development in concrete incorporating PFA and metakaolin. Magazine of concrete research, 2000. 52(3): p. 153-162.*
41. *Debieb, F. and S. Kenai, The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and building materials, 2008. 22(5): p. 886-893.*
42. *Zong, L., Z. Fei, and S. Zhang, Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. Journal of Cleaner Production, 2014. 70: p. 175-182.*
43. *Pascual, A.B., A. Yahia, and P.-C. Nkinamubanzi, Élaboration de Nouveaux Liants Minéraux Pour la Formulation de Bétons Écologiques Et Durables. 2014, Université de Sherbrooke.*
44. *Duxson, P., et al., Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of materials science, 2007. 42(9): p. 2917-2933.*
45. *McLellan, B.C., et al., Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. Journal of cleaner production, 2011. 19(9-10): p. 1080-1090.*
46. *N, B. and M. M, Effet dub temps de calcination slur le comportement physicomécaniques des ciments réactivés. 2018.*
47. *Chen, C.-J., et al., MyD88-dependent IL-1 receptor signaling is essential for gouty inflammation stimulated by monosodium urate crystals. The Journal of clinical investigation, 2006. 116(8): p. 2262-2271.*
48. *Murgier, S., H. Zanni, and D. Gouvenot, Blast furnace slag cement: a 29Si and 27Al NMR study. Comptes Rendus Chimie, 2004. 7(3-4): p. 389-394.*
49. *Shi, C., et al., " Alkali-Activated Cements and Concretes. (2006) 6-29.*

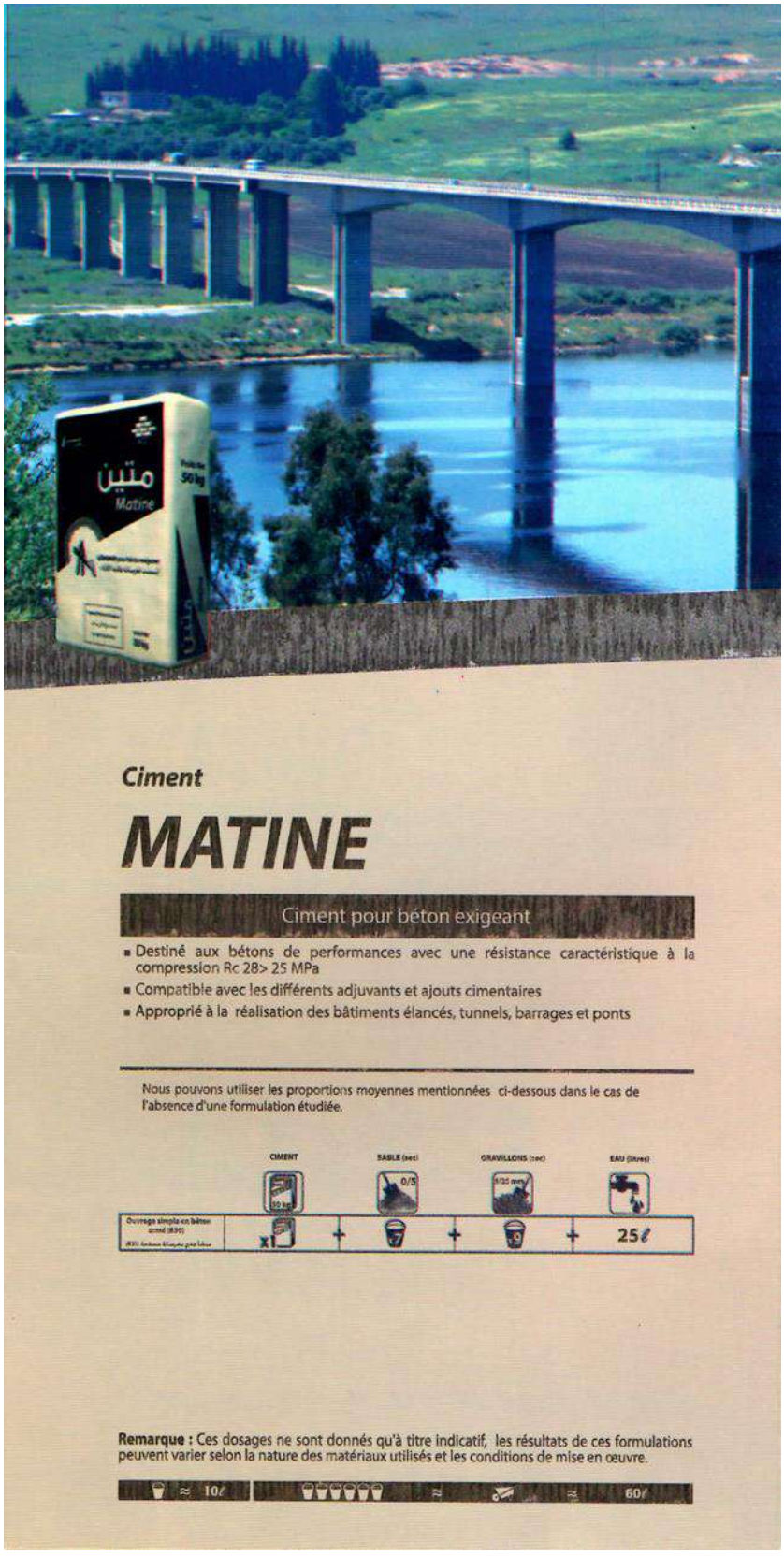
50. *Alonso, S. and A. Palomo, Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures. Cement and Concrete Research, 2001. 31(1): p. 25-30.*
51. *Monzo, M., et al., Alkaline activation of metakaolin. Effect of the soluble silicate addition and curing temperature. BOLETIN DE LA SOCIEDAD ESPANOLA DE CERAMICA Y VIDRIO, 2008. 47(1): p. 35-43.*
52. *Alonso, S. and A. Palomo, Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. Materials Letters, 2001. 47(1-2): p. 55-62.*
53. *Pacheco-Torgal, F., et al., Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. Construction and Building Materials, 2011. 25(9): p. 3732-3745.*
54. *Granizo, M.L., M.T. Blanco-Varela, and S. Martínez-Ramírez, Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. Journal of Materials Science, 2007. 42(9): p. 2934-2943.*
55. *Khale, D. and R. Chaudhary, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. Journal of materials science, 2007. 42(3): p. 729-746.*
56. *Granizo, M.L., et al., Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction. Journal of the American Ceramic Society, 2002. 85(1): p. 225-231.*
57. *Escalante-García, J.I., et al., Hydration Products and Reactivity of Blast-Furnace Slag Activated by Various Alkalis. Journal of the American Ceramic Society, 2003. 86(12): p. 2148-2153.*
58. *Fernández-Jiménez, A., J. Palomo, and F. Puertas, Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. Cement and Concrete Research, 1999. 29(8): p. 1313-1321.*
59. *Somna, K., et al., NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. Fuel, 2011. 90(6): p. 2118-2124.*
60. *Zuhua, Z., et al., Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. Applied Clay Science, 2009. 43(2): p. 218-223.*
61. *Palomo, A., et al., Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. Cement and Concrete Research, 1999. 29(7): p. 997-1004.*
62. *Palomo, A. and A. Fernández-Jiménez. Alkaline activation, procedure for transforming fly ash into new materials. Part I: Applications. in World of Coal Ash (WOCA) Conference. 2011.*
63. *Hardjito, D., et al., On the development of fly ash-based geopolymer concrete. Materials Journal, 2004. 101(6): p. 467-472.*
64. *Wongpa, J., et al., Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. Materials & Design, 2010. 31(10): p. 4748-4754.*
65. *Saidat, F., Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire. 2013, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.*
66. *Shi, C. and J. Qian, High performance cementing materials from industrial slags—a review. Resources, Conservation and Recycling, 2000. 29(3): p. 195-207.*
67. *Raijiwala, D. and H. Patil, Geopolymer concrete: A concrete of the next decade. Concrete Solutions 2011, 2011. 287.*
68. *Shi, C., Pozzolanic reaction and microstructure of chemical activated lime-fly ash pastes. Materials Journal, 1998. 95(5): p. 537-545.*
69. *VOINOVITCH, I. and R. Dron, Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé. SILIC IND, 1976. 41(4/5).*
70. *Alexandre, J. and J.-L. Sebileau, Le laitier de haut fourneau, Elaboration, Traitements, Propriétés, Emploi. Centre Technique et de Promotion des Laitiers, 1988.*
71. *Shi, C., Early hydration and microstructure development of alkali-activated slag cement pastes. X Intern. Cong. Chem, Cem (Goteborg) Vol, 1997. 3.*
72. *Redden, R. and N. Neithalath, Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. Cement and Concrete Composites, 2014. 45: p. 46-56.*
73. *Cyr, M., R. Idir, and T. Poinot, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. Journal of Materials Science, 2012. 47(6): p. 2782-2797.*

74. *Jiang, W., Alkali-activated cementitious materials: mechanisms, microstructure and properties. 1997.*
75. *Allahverdi, A. and J. Ghorbani, Chemical activation and set acceleration of lime-natural pozzolan cement. Ceramics Silikaty, 2006. 50(4): p. 193.*
76. *Živica, V.r., Effectiveness of new silica fume alkali activator. Cement and Concrete Composites, 2006. 28(1): p. 21-25.*
77. *Marciano, E. and A. Battagin. The influence of alkali activator on the early hydration and performance of Portland blast furnace slag cement. in Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg. 1997.*
78. *Lin, K.-L., et al., Effect of composition on characteristics of thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass-metakaolin-based geopolymers. Construction and Building Materials, 2012. 36: p. 501-507.*
79. *De Silva, P. and F. Glasser, Pozzolanic activation of metakaolin. Advances in Cement Research, 1992. 4(16): p. 167-178.*
80. *Shi, C. and R.L. Day, Acceleration of strength gain of lime-pozzolan cements by thermal activation. Cement and Concrete Research, 1993. 23(4): p. 824-832.*
81. *Shi, C. and R.L. Day, Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans. Cement and Concrete Research, 1993. 23(6): p. 1389-1396.*
82. *EN, N., 933-1: Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie 1: détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR, 1997.*
83. *Collection Mémento Technique, "Tuiles et Briques de Terre Cuite", Edition Moniteur paris 1998.*
84. *NF EN 1097-6; « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR. 2001.*
85. *NF EN 1097-3, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR. 1998.*
86. *VENUAT, M., "Produits Silico–calcaire "Techniques de l'Ingénieur 1994.*
87. *Harrat, M., Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site: unité Maghreb céramique de Touggourt. 2007, Université Kasdi Merbah de Ouargla.*
88. *Ibn Ghazala, M., Synthèse des complexes organo et inorgano-pyrophyllite et leur application dans le traitement des eaux chargées en métaux lourds. 2009.*
89. *EN, N., 196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques. French Standard, 2006.*
90. *CEN EN 196-1 Nome française CENEN 196-1 ≪ Méthode d'essais des ciments, partie I : ≪ Détermination des résistances mécanique ≫ AFRON, Paris. Aout 1995.*
91. *NF EN 1015-18, Méthodes d'essais sur mortier de maçonnerie, Partie 18 : Absorption d'eau par capillarité du mortier durci. 2002.*
92. *Hornain, H., GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons. 2007: Presses des Ponts.*
93. *Shi, C., Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. Cement and Concrete Research, 1996. 26(12): p. 1789-1799.*
94. *Rougeau, P., Les résultats d'essais croisés AFREM «Essai de carbonatation accéléré», dans Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons,«méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité». 1997, France.*

ANNEXES

ANNEXE A

FICHE TECHNIQUE DE CIMENT



ANNEXE A

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

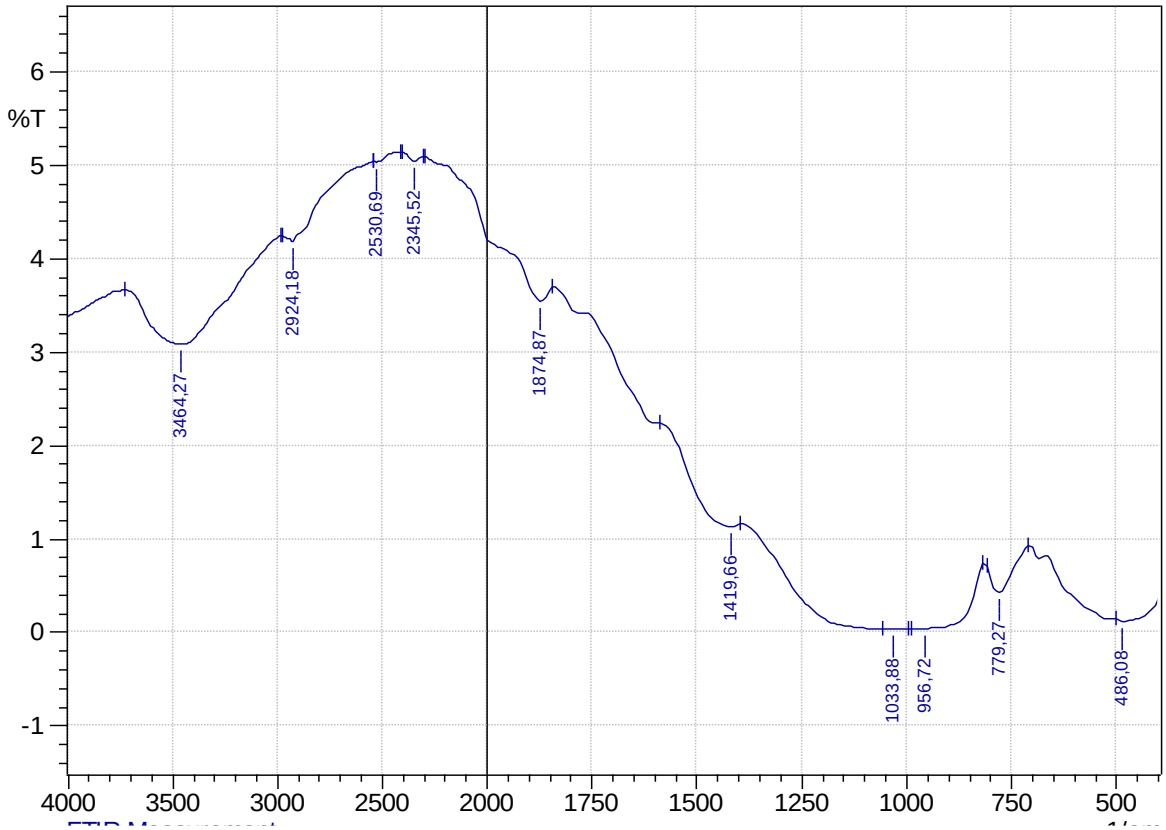
- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

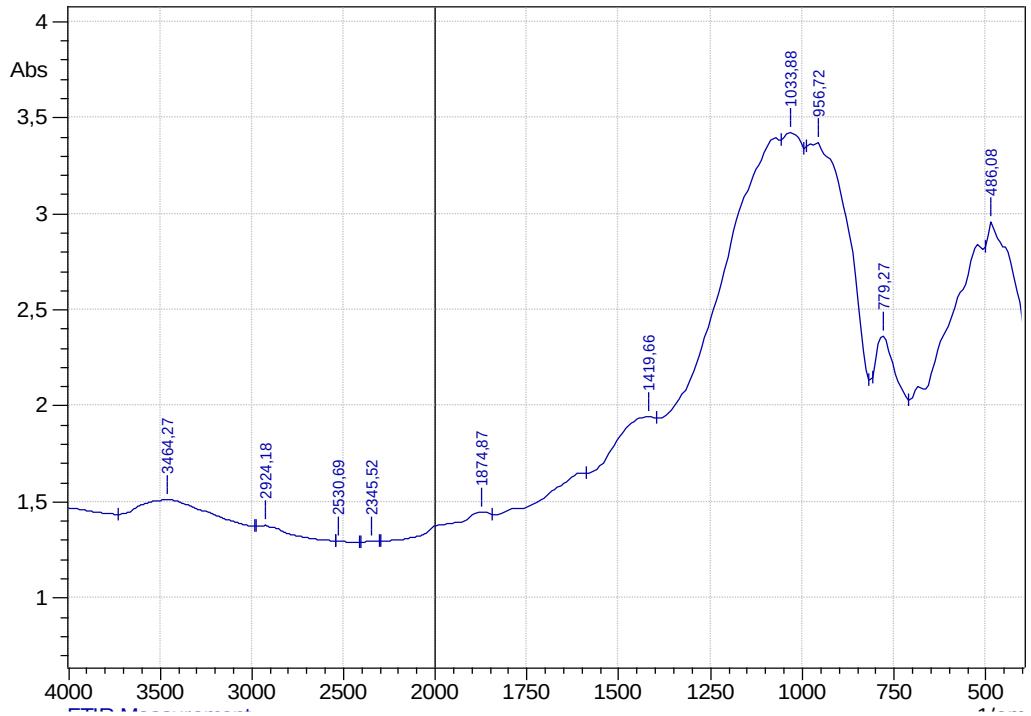
Annexes B

Analyses chimiques des poudres de brique calciné a 600°C ; 800°C ;1000°C et non calcination

Brique 1000°C broyé 7min trans



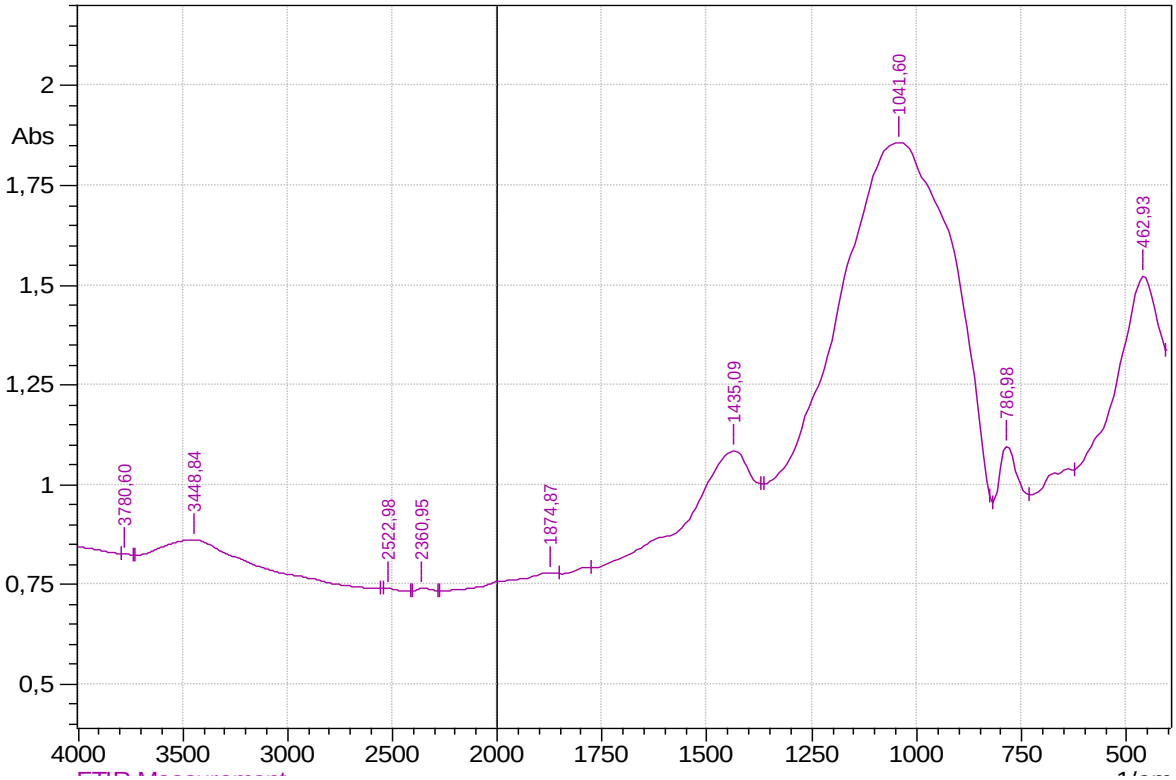
Brique 1000°C broyé 7min abs



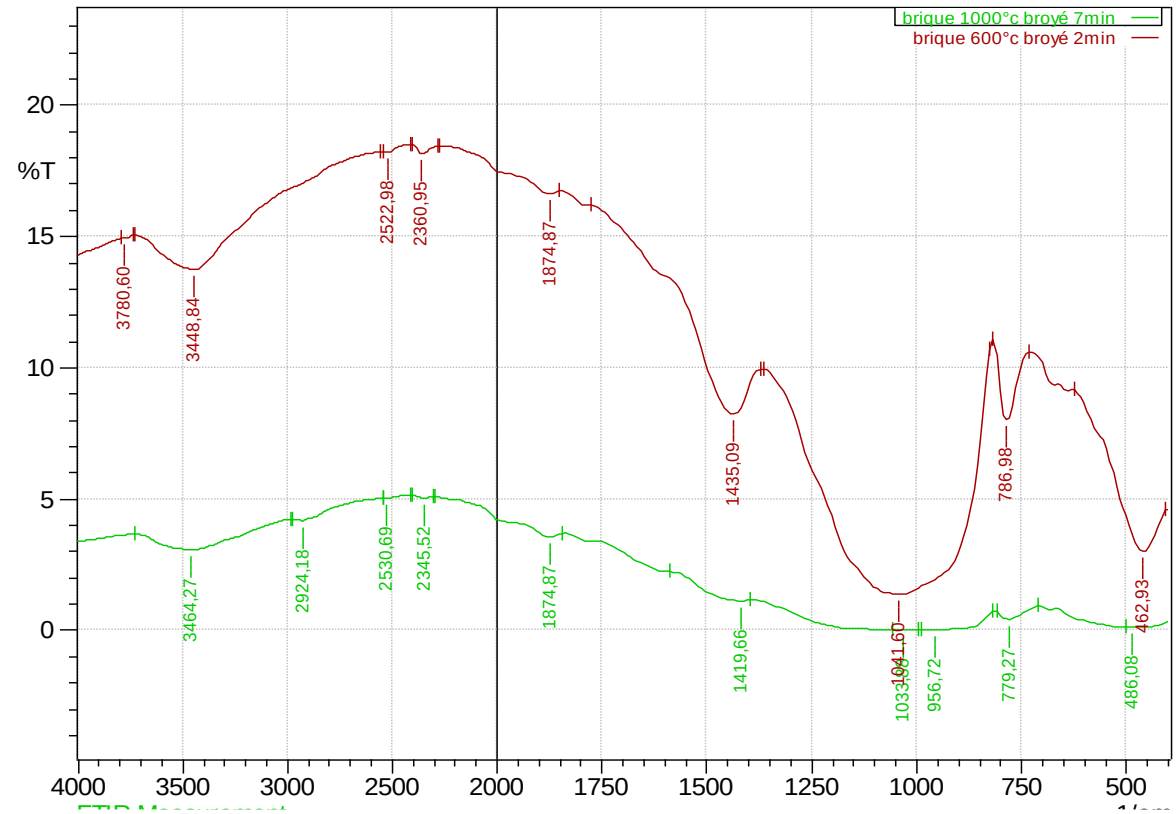
Brique 600°C broyé 2min trans



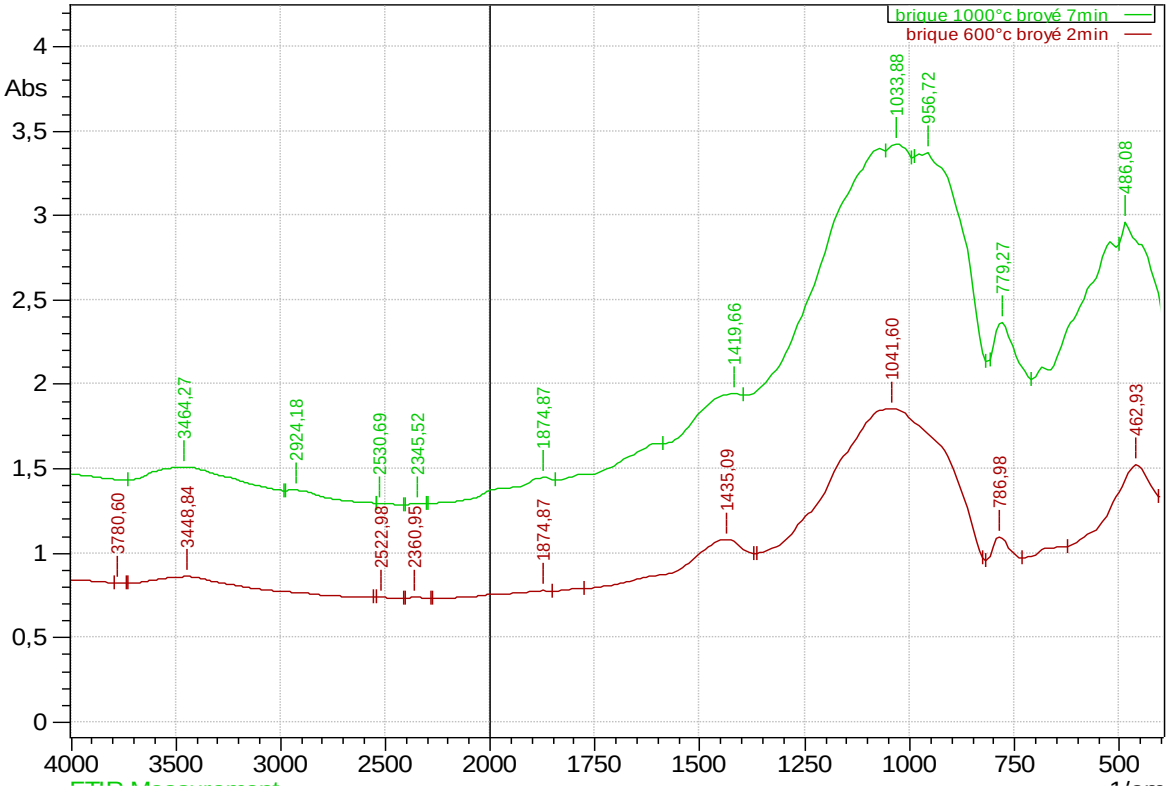
Brique 600°C broyé 2min abs



Superposé des deux graphes précédent trans

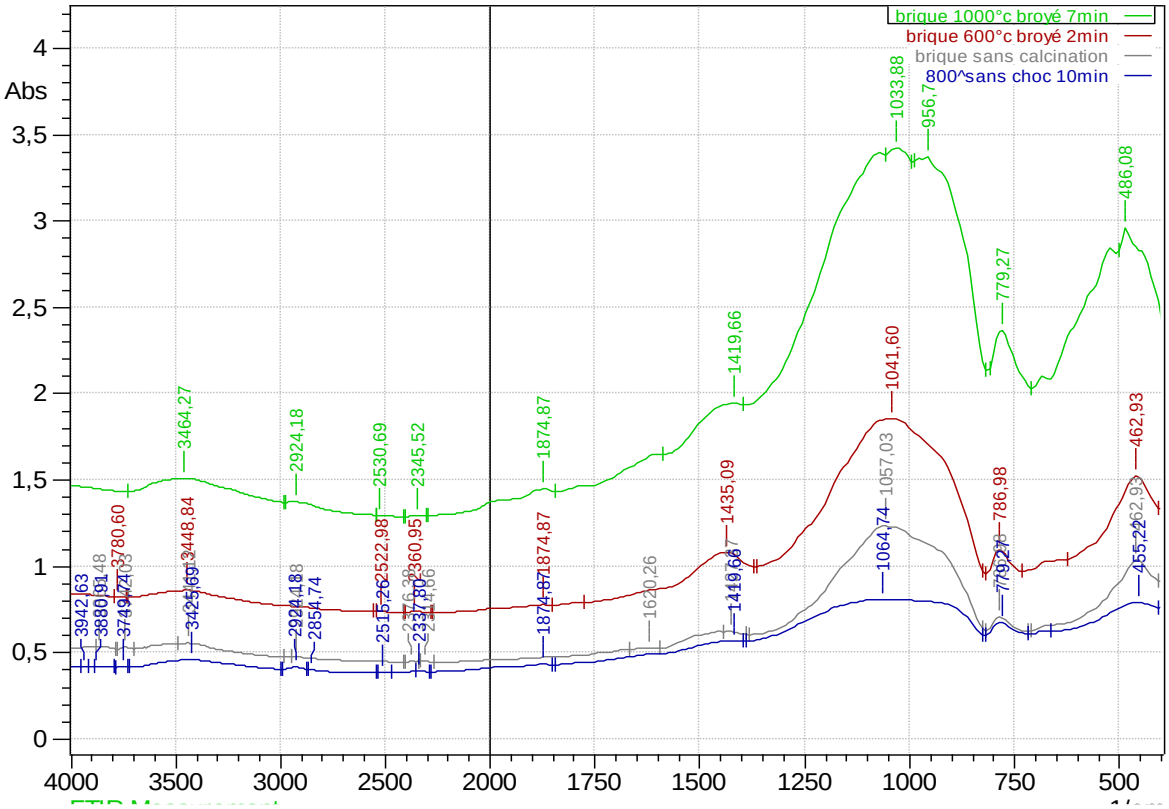


Superposé des deux graphes précédent abs



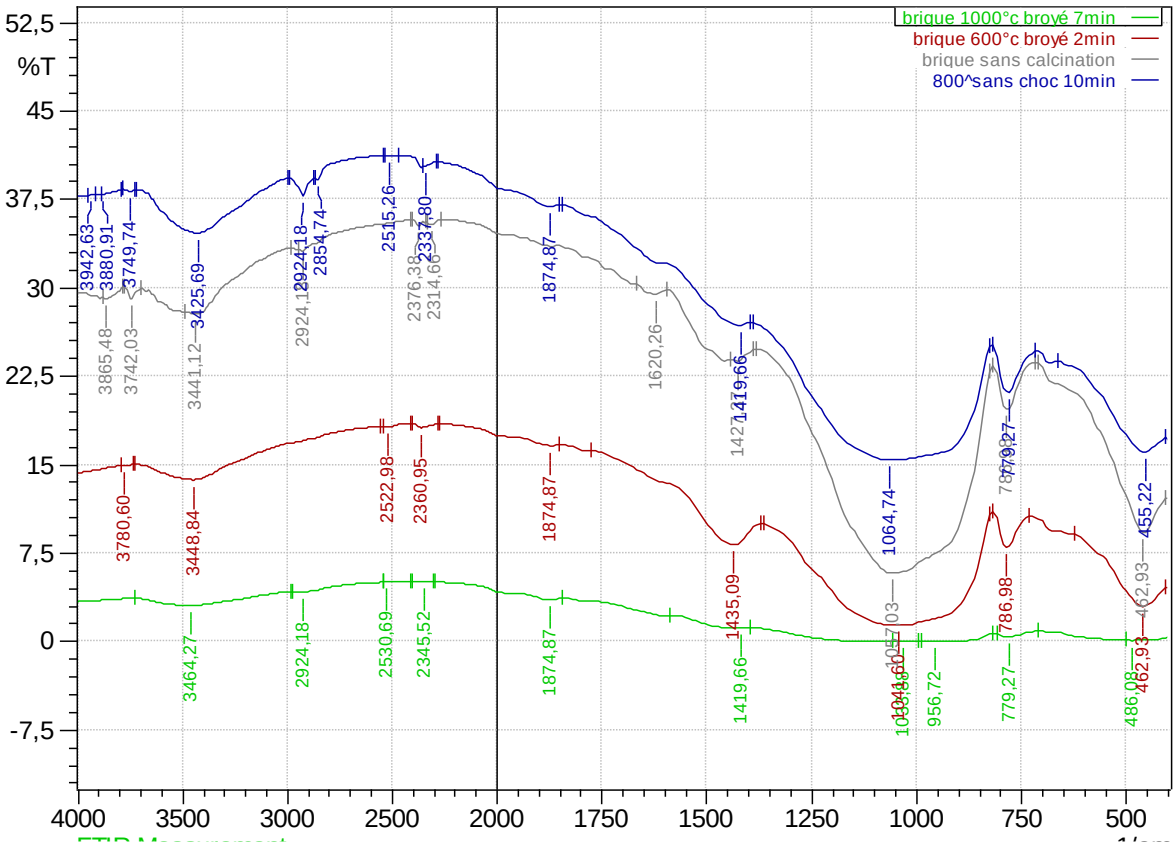
Superposé de (sans calcination+brique 1000°c 7min+brique 600°C 2min+800°C 10 min) abs

ANNEXE B



Superposé de (sans calcination+brique 1000°c 7min+brique 600°C 2min+800°C 10 min) trans

ANNEXE B


brique 1000°c broyé 7min
brique 600°c broyé 2min
brique sans calcination
800^sans choc 10min
%T
52,5
45
37,5
30
22,5
15
7,5
0
-7,5
4000
3500
3000
2500
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
3942,63
3880,91
3749,74
3425,69
2924,18
2854,74
2515,26
2337,80
1874,87
1620,26
1419,66
1064,74
779,27
455,22
3865,48
3742,03
3441,12
2924,18
2376,38
2314,66
1427,16
1419,66
1064,74
779,27
3780,60
3448,84
2522,98
2360,95
1874,87
1435,09
1064,74
786,98
462,93
3464,27
2924,18
2530,69
2345,52
1874,87
1419,66
1064,74
956,72
779,27
486,08
462,93