

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

Faculté de technologie

Département de Génie Civil

THESE DE DOCTORAT ES SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

**FORMULATION ET COMPORTEMENT D'UN BETON
FLUIDE A BASE DE GRANULATS RECYCLES DE
BRIQUE**

Par

Mr. SI-AHMED Mohammed

Devant le jury composé de :

Professeur ABED Mohamed	Université de Blida1	Président
Professeur BALI Abderrahim	Ecole Nationale Polytechnique Alger	Examineur
Professeur MENADI Belkacem	Université de Blida 1	Examineur
Docteur HADJ-SADOK Ahmed	Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique	Examineur
Professeur KENAI Said	Université de Blida1	Directeur de thèse
Professeur GHORBEL Elhem	Université de Cergy Pontoise (France)	Co-encadreur

Blida, 2018

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à Monsieur le Professeur Said KENAI de l'Université de Blida1 département de génie civil, pour avoir dirigé ce travail de recherche. Je lui exprime ici mon profond respect et ma grande gratitude.

Je voudrais également exprimer mes remerciements à Madame le Professeur Elhem GHORBEL co-directrice de ma thèse pour m'avoir accueilli et aidé à réaliser une partie de l'étude expérimentale au laboratoire L2MGC de l'Université de Cergy-Pontoise (France). Ses précieux conseils m'ont été d'un grand apport.

Je souhaite exprimer mes remerciements à Monsieur le Professeur Mohamed ABED et Monsieur le Professeur Belkacem MENADI de l'Université de Blida1, Monsieur le Professeur Abderrahim BALI de l'Ecole Polytechnique d'Alger ainsi qu'à Monsieur le Docteur Ahmed Hadj-Sadok de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, pour avoir bien voulu accepter de participer à ce jury, témoignant ainsi de l'intérêt qu'ils portent à ce travail.

Je remercie tous les techniciens du laboratoire de géo matériaux et génie civil (LMGC) de l'Université de Blida1 et tous les techniciens du laboratoire L2MGC de l'Université de Cergy-Pontoise, pour m'avoir permis de réaliser cette étude expérimentale.

Je n'oublie pas de remercier également Mr Lamine BENTABAK de l'entreprise LAFARGE, pour son aide.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble des personnels enseignants, technique et administratif ainsi qu'à l'ensemble des chercheurs des laboratoires LMGC de l'Université de Blida1 et L2MGC de l'Université de Cergy-Pontoise.

Je voudrais adresser aussi mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur Mustapha Temmar Directeur du département mécanique de l'Université de Blida1, pour son accompagnement et son soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Je souhaite enfin, remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué au bon déroulement de ce travail.

DEDICACES

A mes chers parents, à qui je dois tout

A mon épouse

A tous mes frères et à ma sœur.

ملخص

يوفر استخدام الإضافات في الأسمنت لتصنيع الخرسانة والملاط مزايا اقتصادية وبيئية لا يمكن إنكارها. تم إنجاز دراسات قليلة للخصائص الميكانيكية وديمومة الخرسانة والملاط باستخدام الميتاكاولان المحلي ونفايات الأجر. الغرض الرئيسي من هذه الدراسة هو صياغة وتحليل أداء الملاط والخرسانة المصنعة من الميتاكاولان ونفايات الأجر. وقد تم تحضير الميتاكاولان بحرق الكولين عند درجة 850 درجة مئوية لمدة ثلاث ساعات، وتم إنتاج مسحوق الطوب عن طريق طحن الأجر من نفايات وحدة تصنيع محلية.

أظهرت النتائج أن استبدال نسبة 10% و15% من الاسمنت بالميتاكاولان يزيد من مقاومة ضغط الخرسانة والاستبدال بنسبة تصل إلى 30% يزيد من مقاومة الشد، كما أنه تم تحسين الديمومة بتخفيض امتصاص الماء وتخفيض النفاذية.

أما بالنسبة لاستبدال الأسمنت بمسحوق الأجر، فقد أظهرت النتائج زيادة زمن الأخذ و إنخفاض حرارة التمييه و نقصان قابلية التشغيل. كما لوحظ أيضا تقليل إنتاج البورتلانديت في سن مبكر وزيادتها على المدى الطويل للملاط المصنوع من مسحوق الأجر. يؤدي استبدال 5 و 10 % من الاسمنت بمسحوق الأجر على المدى الطويل إلى ملاط ذو مقاومة ضغط مكافئة لمقاومة الملاط دون إضافات. يحسن الاستبدال بنسبة 5% من مسحوق لأجر من مقاومة الشد على المدى الطويل وتبقى الخلائط الأخرى مماثلة. يبين التحليل الحراري أن خلائط الأسمنت التي تحتوي على مسحوق الأجر قد تحسن تفاعل التمييه بشكل كبير بين 28 و 180 يوماً.

مفاتيح: الميتاكاولان، مسحوق الأجر، مقاومة الضغط، مقاومة الشد، الديمومة، الأخذ، حرارة التمييه، التحليل الحراري .

RESUME

L'utilisation des ajouts dans le ciment pour la fabrication des mortiers et bétons offrent des avantages économiques et écologiques indéniables. Peu d'études se sont intéressé aux propriétés mécaniques et durabilité des mortiers et bétons à base du ciment au métakaolin local ou aux fines de déchets de brique. Le but principal de cette étude est de formuler et d'analyser la performance des mortiers et bétons à base de métakaolin et fines de déchets de brique. La préparation du métakaolin a été réalisée par une calcination du Kaolin de Mila à une température de 850 °C pendant une durée de 3 heures et les fines de brique sont produites par le broyage de brique issues de déchets d'une unité de fabrication, locale.

Les résultats observés ont montré que les taux de substitution de 10 et 15% du ciment par du métakaolin augmentent la résistance à la compression du béton. Lorsque cette substitution augmente jusqu'à 30%, elle améliore la résistance à la flexion des mortiers. La durabilité a été également accrue par une diminution du coefficient d'absorption et une réduction de la perméabilité à l'eau.

En ce qui concerne la substitution du ciment par les fines de déchets de brique, les résultats observés montrent une augmentation du temps de prise du ciment, une baisse de la chaleur d'hydratation et une très légère perte d'ouvrabilité. La production de portlandite est réduite au jeune âge, mais elle s'accroît à long terme pour les mortiers à base de fines de brique. Les taux de substitution de 5 et 10% produisent à long terme des classes de résistance équivalentes aux mortiers témoins (sans substitution). Le taux de substitution de 5% de ciment en fines de brique améliore la résistance en flexion à long terme, mais les autres mélanges restent comparables. L'analyse thermique différentielle et thermogravimétrique (ATD/ATG) montre que l'hydratation du ciment incorporant les fines de brique est nettement améliorée entre 28 et 180 jours de cure humide.

Mots clés : Métakaolin, déchets de brique, résistance à la compression, résistance à la flexion, durabilité, prise, chaleur d'hydratation, analyse thermique.

ABSTRACT

The use of additions in cement for the manufacture of mortar and concrete offers economic and ecological advantages. Few studies have investigated the mechanical and durability properties of mortars and concretes based on local metakaolin and waste brick powder. The main purpose of this study is to formulate and analyze the performance of mortar and concrete based on metakaolin and waste brick powder. The metakaolin was produced by calcining kaolin of Mila at a temperature of 850 ° C for 3 hours and waste brick powder was obtained from crushed recycled bricks recovered from a local brick plant.

The results observed showed that the substitution rates of 10 and 15% of cement by metakaolin increase the compressive strength of concrete and the substitution up to 30% improves the flexural strength of mortars. Durability has been improved by decreasing the absorption coefficient and reducing water permeability.

For cement substitution by waste brick powder, the results show delays in the setting of cement, the decrease of the heat of hydration and a slight loss of workability. Portlandite production is reduced at younger ages and increased at the long term for mortars with waste brick powders. Substitution rates of 5 and 10% give at long-term, a comparable strength classes to control mortars (without substitutions). The substitution rate of 5% of cement powder by brick powder improves the flexural strength in the long term, while the other mixtures remain comparable. Differential thermal and thermogravimetric analysis (ATD / ATG) shows that the hydration of the cement incorporating waste bricks powder significantly improved between 28 and 180 days of wet cure.

Key words: Metakaolin, waste brick, compressive strength, flexural strength, durability, setting, heat of hydration, thermal analysis.

Liste d'abréviations et notations

Abs : Absorption d'eau par immersion
ATD : Analyse thermodifférentielle
ATG : Analyse thermogravimétrique
CAE : Coefficient d'absorption d'eau
C3S : Silicate tricalcique (alite)
C2S : Silicate bicalcique (belite)
C4AF : Aluminate-ferrite tetracalcique
CaCO₃ : Carbonate de calcium
CaSO₄ : Gypse
C3A : Aluminate tricalcique
CSH : Silicate de calcium hydraté
Ca(OH)₂ : Portlandite
Ca : Absorption d'eau
C : Dosage en ciment
CRS : Ciment résistant aux sulfates
CEM I: Ciment Portland sans ajout
CEM II : Ciment portland avec ajout
DSC : Analyse calorimétrique différentielle
DB : Fines de déchets de brique
E/C : Rapport eau sur ciment
Ft : Résistance à la traction par flexion
Fc : Résistance à compression
L : Liant
MK: Métakaolin
MEB : Microscope à balayage
Pw : Porosité à l'eau
Pwv : Porosité à l'eau sous vide
PM: Perte de Masse
S : Coefficient d'absorption capillaire
SP : Super plastifiant

Liste des figures

	Page
Figure I.1 : Proportion des différents déchets en France.....	31
Figure I.2: Fluidité des mortiers à base de différents taux de substitution de sables par les DB.....	32
Figure I.3 : Effet des déchets de brique sur la résistance à la compression des mortiers	33
Figure I.4 : Effet des déchets de brique sur la résistance à la compression des bétons.....	34
Figure I.5 : Effet des déchets de brique sur le retrait des barres de mortier	35
Figure I.6 : Expansion du mortier soumis aux cycles gel-dégel	36
Figure I.7 : Expansion et variation du poids des mortiers à base de brique.....	39
Figure I.8 : Résistance à la compression des mortiers à base de brique, exposé à l'eau de mer pendant une durée de 560 jours	40
Figure I.9 : Expansion de mortiers contenant différents types de déchets de brique.....	42
Figure I.10 : Augmentation du poids des mortiers contenant différents types de déchets de brique	43
Figure I.11 : Corrélation entre l'expansion et l'augmentation du poids des mortiers contenant différents types de déchets de brique (B,D,L,P) exposé à des solutions de sulfates de sodium	44
Figure I.12 : Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la densité et la compacité des mortiers	45
Figure I.13 : Effet des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la porosité totale	45
Figure I.14 : Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB et MK sur la distribution des pores.....	46
Figure I.15 : Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB sur la sorptivité..	47
Figure I.16 : Effet des différents taux de substitution de sable par les brique.....	47
Figure I.17 : Effet des différents taux de substitution de gravier par les briques	48
Figure II.1 : Différents types d'argile utilisées pour la fabrication des briques.....	56
Figure II.2 : Déchets de brique de fabrication déposés aux alentours de la briqueterie.....	57
Figure II.3 : Localisation des sources de déchets de brique et du kaolin sur la carte d'Algérie.....	57
Figure II.4 : Fines de déchets de brique après broyage.....	58

Figure II.5 : Kaolin.....	59
Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable normalisé.....	60
Figure II.7 : Sable de Baghlia.....	61
Figure II.8 : Distribution granulométrique des granulats.....	62
Figure II.9 : Calcination du kaolin.....	63
Figure II.10 : Etalement de mortier.....	64
Figure II.11 : Principe de l'étalement à la table à choc.....	65
Figure II.12 : Mesure de l'expansion des éprouvettes 25x25x28mm.....	66
Figure II.13 : Essai de consistance au cône d'Abrams.....	67
Figure II.14 : Essai de compression pour béton.....	68
Figure II.15 : Schéma (a) et vue d'ensemble (b) du dispositif d'essai de l'absorption d'eau par capillarité.....	69
Figure II.16 : Sciage des éprouvettes cylindriques de béton.....	70
Figure II.17 : Appareillage de mesure de la perméabilité au gaz.....	71
Figure II.18 : Schéma du perméamètre de type Cembureau.....	71
Figure II.19 : Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression.....	72
Figure II.20 : Essai de traction par fendage (essai Brésilien).....	72
Figure II.21 : Calorimètre adiabatique à l'intérieur de la chambre climatique.....	73
Figure II.22 : Centrale d'acquisition.....	73
Figure II.23 : Vibrobroyeur à disque et sa garniture.....	74
Figure II.24 : Machine utilisé pour l'essai ATD/ATG.....	75
Figure II.25 : Microscope électronique à balayage.....	76
Figure II.26 : Dispositif pour l'essai de retrait.....	77
Figure II.27 : Programme expérimental de l'étude sur le métakaolin.....	78
Figure II.28 : Programme expérimental de l'étude sur les fines de DB.....	79
Figure III.1 : Influence de la teneur en MK sur la demande en superplastifiant pour les mortiers.....	82
Figure III.2 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge.....	84
Figure III.3 : Résistance à la compression relative des mortiers en fonction de l'âge.....	84
Figure III.4 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de l'âge.....	87
Figure III.5 : Résistance à la flexion relative des mortiers en fonction de l'âge.....	87
Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de l'âge.....	89
Figure III.7 : Résistance à la compression relative des bétons.....	90

Figure III.8 : Absorption d'eau capillaire des différents mélanges de béton en 7 jours.....	92
Figure III.9 : Sorptivité des différents mélanges de béton en 7jours.....	93
Figure III.10 : Corrélation entre le coefficient d'absorption et le rayon moyen des pores.....	94
Figure III.11 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons à base de MK.....	95
Figure III.12 : Résultats de pénétration d'eau sous pression dans les bétons.....	95
Figure III.13 : Résultats de perméabilité au gaz dans les bétons.....	96
Figure III.14 : Expansion des mortiers dans la solution de sulfate de sodium	97
Figure III.15 : Expansion des mortiers dans la solution de sulfate de magnésium	98
Figure III.16 : Expansion des mortiers dans l'eau de mer.....	98
Figure IV.1 : Photos MEB des déchets de brique broyés.....	103
Figure IV.2 : Analyse calorimétrique différentiel des fines de brique.....	104
Figure IV.3 : Analyse calorimétrique différentiel du CEM I.....	105
Figure IV.4 : Analyse calorimétrique différentiel du CEM II.....	105
Figure IV.5 : Relation entre la consistance et les différents taux de substitution de ciment CEM II par la brique.....	107
Figure IV.6 : Début de prise des pâtes avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de brique.....	108
Figure IV.7 : Fin de prise des pâtes avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de brique.....	109
Figure IV.8 : Influence des fines de brique sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment CEM II.....	111
Figure IV.9 : Influence des fines de brique sur le flux de chaleur des mortiers à base de ciment CEM II.....	112
Figure IV.10 : Influence des fines de brique sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment CEM I.....	115
Figure IV.11 : Influence des fines de brique sur le flux de chaleur des mortiers à base de ciment CEM I.....	115
Figure IV.12 : ATD sur mortiers DB à base de CEM II.....	119
Figure IV.13 : ATG sur mortiers DB à base de CEM II.....	119
Figure IV.14 : ATD sur mortiers DB à base de CEM I.....	122
Figure IV.15 : ATG sur mortiers DB à base de CEM I.....	122
Figure IV.16 : Effet des fines de brique sur l'évolution de la portlandite en fonction de l'âge pour les mortiers à base de de ciment CEM II.....	124

Figure IV.17 : Effet des fines de brique sur l'évolution de la portlandite en fonction de l'âge pour les mortiers à base de de ciment CEM I.....	127
Figure IV.18 : Evolution du retrait des mortiers à base de DB.....	130
Figure IV.19 : Résistance à la compression des mortiers DB à base de ciment CEM II	133
Figure IV.20 : Résistance à la compression des mortiers DB à base de ciment CEM I	135
Figure IV.21 : Corrélation entre la résistance en compression expérimentale et théorique en fonction du temps pour les différents mortiers à base de CEM II et fines de brique.....	138
Figure IV.22 : Relation entre le coefficient B de la formule théorique et les taux de substitution de ciment CEM II en fines de déchets de brique.....	139
Figure IV.23 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de ciment CEM II.....	140
Figure IV.24 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de ciment CEM I.....	143
Figure IV.25 : MEB sur mortier de référence à Base de ciment CEM II	145
Figure IV.26 : MEB sur mortier à base de ciment CEM II et de fines de déchets de brique..	145
Figure IV.27 : MEB sur mortier à base de ciment CEM I et de fines de déchets de brique ..	146

Liste des tableaux

	Page
Tableau I.1 : Taux de réactivité pouzzolanique de différents matériaux.....	28
Tableau I.2 : Effet du MK et des DB sur la performance des mortiers et bétons.....	49
Tableau II.1 : Composition chimique des déchets de brique DB.....	58
Tableau II.2 : Composition chimique du kaolin.....	59
Tableau II.3 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques des ciments.....	59
Tableau II.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques des ciments.....	60
Tableau II.5 : Caractéristiques du sable de Baghlia.....	61
Tableau II.6 : Caractéristiques des granulats.....	62
Tableau III.1 : Résistance à la compression des différents mortiers étudiés de 1 à 180 jours..	85
Tableau III.2 : Résistance à la flexion des différents mortiers étudiés de 1 à 180 jours.....	88
Tableau III.3 : Les différentes combinaisons de bétons (CEM I+MK + SP) pour 1m ³ de béton.....	89
Tableau III.4 : Résistance à la compression des différents bétons étudiés.....	91
Tableau IV.1 : Consistance des pâtes avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de déchets de brique.....	106
Tableau IV.2 : Temps de début et fin de prise des pâtes de ciments avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de déchets de brique.....	108
Tableau IV.3 : Les différentes combinaisons (Ciment + brique + SP).....	111
Tableau IV.4 : ATG pour les mortiers DB à base de ciment CEM II après 7 jours, 28 jours et 180 jours de cure humide.....	120
Tableau IV.5 : ATG pour les mortiers DB à base de ciment CEM I après 7 jours, 28 jours et 180 jours de cure humide	123
Tableau VI.6 : Taux de portlandite des mortiers DB à base de CEM II en fonction de l'âge.....	124
Tableau VI.7 : Taux de portlandite dans les différents mélanges en fonction de l'âge.....	127
Tableau IV.8 : Retrait des mortiers DB en fonction du temps.....	131
Tableau IV.9 : Résistance à la compression des mortiers DB à base de CEM II de 7 à 180 jours	133

Tableau IV.10 : Résistance à la compression des mortiers à base de CEM I de 7 à 56jours..136

Tableau IV.11 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de CEM II de 7 à 180jours.141

Tableau IV.12 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de CEM I de 7 à 56 jours...143

Table des matières

	Page
Résumé.....	03
Liste d'abréviations et notations.....	06
Liste des figures.....	07
Liste des tableaux.....	11
Introduction générale.....	18
Chapitre I : Revue bibliographique	
I.1 Introduction.....	24
I.2 Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés de bétons et mortiers.....	24
I.2.1 Les fillers calcaires.....	25
I.2.2 La pouzzolane.....	25
I.2.3 la fumée de silice.....	25
I.2.4 Les cendres volantes.....	26
I.2.5 Le laitier de haut fourneau.....	26
I.2.6 Hydratation des ciments pouzzolaniques.....	26
I.3 Métakaolin	27
I.3.1 Production du métakaolin.....	27
I.3.2 Composition chimique et finesse du MK.....	28
I.3.3 Pouzzolanité du MK.....	28
I.4 Influence du métakaolin sur l'hydratation du ciment.....	29
I.5 Fines de brique d'argiles cuites	30
I.6 Intérêt de l'utilisation des déchets de brique dans la construction.....	31
I.7 Effet des déchets de brique sur l'ouvrabilité.....	32
I.8 Effets des déchets de brique sur la résistance à la compression.....	33
I.9 Effet des déchets de brique sur le retrait.....	34
I.10 Effet des déchets de brique sur le gel-dégel.....	35
I.11 Effet de l'eau de mer sur les mortiers et bétons à base de briques.....	36
I.12 Effet des sulfates de sodium sur les mortiers et bétons à base de brique.....	40

I.13 Effet des déchets de brique sur la porosité.....	44
I.14 Effet des déchets de brique sur l'absorption capillaire et la sportivité.....	46
I.15 Effet des déchets de brique sur les émissions des ions de chlores.....	48
I.16 Performance des mortiers et bétons à base de MK et DB.....	48
I.17 Conclusion.....	50
Références bibliographiques.....	50

CHAPITRE II : Matériaux et protocole expérimental

II.1 Introduction.....	56
II.2 Matériaux utilisés.....	56
II.2.1 Les fines de déchet de brique.....	56
II.2.2 Le Kaolin	58
II.2.3 Ciment.....	59
II.2.4 Sable pour mortier	60
II.2.5 Sable pour béton	61
II.2.6 Gravier	61
II.2.7 Adjuvants	62
II.2.8 L'eau de gâchage.....	62
II.3 Protocole expérimental	63
II.3.1 Traitement thermique du kaolin.....	63
II.3.2. Essai de consistance et de prise	63
II.3.3. Essai d'étalement des mortiers.....	64
II.3.4 Résistance des mortiers à la compression et à la flexion	65
II.3.5 Résistance aux sulfates et à l'eau de mer	66
II.3.6 Formulation et préparations des éprouvettes de bétons.....	67
II.3.7 Essai d'ouvrabilité des bétons.....	67
II.3.8 Résistance à la compression des bétons	68
II.3.9. Absorption d'eau par capillarité des bétons.....	68
II.3.10 Perméabilité au gaz	69
II.3.11 Essai de pénétration d'eau sous pression	72

II.3.12 Calorimétrie semi adiabatique.....	73
II.3.13 Analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique.....	74
II.3.14 Essais au microscope électronique à balayage	75
II.3.15 Essai de retrait total.....	76
II.4 Organigrammes des essais expérimentaux	78
Références bibliographique.....	80

Chapitre III : Résultats et Analyse, métakaolin

III.1 Introduction.....	82
III.2 Influence du MK sur la maniabilité du mortier	82
III.3 Influence du MK sur la résistance à la compression des mortiers.....	82
III.4 Influence du MK sur la résistance à la flexion des mortiers.....	86
III.5 Influence du MK sur l'ouvrabilité des bétons.....	88
III.6 Influence du MK sur la résistance à la compression du béton.....	89
III.7 Effet du métakaolin sur l'absorption d'eau par capillarité des bétons.....	92
III.8 Effet du métakaolin sur la pénétration d'eau sous pression dans les bétons.....	94
III.9 Effet du métakaolin sur la perméabilité au gaz des bétons.....	95
III.10 Effet du métakaolin sur la résistance aux sulfates de sodium, magnésium et à l'eau de mer.....	97
III.11 Conclusion.....	99
Références bibliographiques	100

Chapitre IV : Résultats et Analyse, déchets de brique

IV.1 Introduction	103
IV.2 MEB sur les fines de déchets de brique.....	103
IV.3 DSC/ATG appliqué sur les différents poudres (Brique, CEM I, CEM II).....	103
IV.4 Essai de consistance	106
IV.5 Début et fin de prise des pâtes	107
IV.6 Influence des fines de brique sur l'ouvrabilité des mortiers.....	110
IV.7 Influence des DB sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de CEM II... ..	111

IV.8 Influence des DB sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de CEM I.....	114
IV.9 Suivi de l'hydratation des liants par l'analyse thermique	117
IV.9.1 ATD/ATG sur mortiers à base de CEM II à différents âges.....	118
IV.9.2 ATD/ATG sur mortiers à base de CEM I.....	121
IV.10 Evaluation du taux de portlandite pour les mortiers à base de CEM II.....	121
IV.11 Evolution des taux de portlandite pour mortiers de CEM I.....	126
IV.12 Retrait total des mortiers à base de DB.....	128
IV.13 Influence des DB sur la résistance en compression des mortiers de CEM II	132
IV.14 Résistance à la compression en utilisant des mortiers de CEM I.....	135
VI.15 Résistance en flexion des mortiers de CEM II.....	140
IV.16 Résistance à la flexion des mortiers de CEM I.....	142
IV.17 MEB sur mortier normalisé et mortier à base de déchet de brique.....	145
IV.18 Conclusion.....	146
Références bibliographique.....	148
Conclusions générales et perspectives	152
Annexe.....	

Introduction Générale

Introduction générale

L'industrie de la construction est l'une des plus importantes consommatrices de ressources naturelles et d'énergie. Elle est également responsable de la production de quantités importantes de déchets. La fabrication du ciment et des granulats consomme une grande quantité de ressource naturelle et émet des gaz à effet de serre. La production mondiale du ciment est responsable d'environ 7% du totale des émissions de CO₂ [1]. En outre, les structures en béton ayant subi des dégradations provoquées par les attaques chimiques et physiques de l'environnement, nécessitent leur réhabilitation. Ce qui conduira vers une consommation supplémentaire du ciment. Pour améliorer la durabilité des structures en béton, et pour réduire la consommation du ciment, l'incorporation de matériaux cimentaires supplémentaires constitue une bonne alternative. De plus, en raison de leur activité pouzzolanique élevée et de leur effet de remplissage, le recours aux ajouts cimentaires, peut conduire à la production d'un béton plus compact, avec de meilleures caractéristiques mécaniques et une perméabilité réduite [1-4].

Les ajouts cimentaires peuvent provenir des matériaux naturels, ou des sous-produits, voir des déchets industriels. Parmi les ajouts les plus répondus dans l'industrie cimentaire, on peut citer les fillers calcaires, la fumée de silice, les cendres volantes, la pouzzolane naturelle, les laitiers granulés de hauts fourneaux, les métakaolins et d'autres encore. Ces ajouts offrent souvent de nombreux avantages aux ciments. L'effet physique apporté par certains ajouts, comme les métakaolins, la fumée de silice et les filler calcaire, améliorent la granulométrie des mélanges par un effet de remplissage, conduisant ainsi à une meilleure résistance vis-à-vis de la perméabilité et donc à l'amélioration de la durabilité. L'effet physico-chimique et chimique apportés aussi par d'autres ajouts comme les cendres volantes, la pouzzolane, les laitiers granulés de haut fourneau, les argiles calcinés et d'autres, augmente la production de C-S-H par l'effet pouzzolanique, conduisant ainsi à une meilleure densification de la matrice cimentaire, et à l'amélioration des résistances mécanique et à la durabilité.

L'hydratation du ciment produit des gels de silicates de calcium hydraté C-S-H qui représente la principale phase de liaison du béton. La portlandite (CH) ainsi produite est considérée comme le principal facteur de faiblesse de la matrice cimentaire, influençant la résistance, la structure des pores ainsi que la durabilité. L'ajout d'un matériau pouzzolanique consomme la portlandite et améliore les performances du béton. En tant que matériau poreux, la distribution des tailles et la structure des pores, affecte les propriétés et la durabilité du béton [5-7].

Le metakaolin est fréquemment étudié par de nombreux chercheurs en raison de sa haute réactivité pouzzolanique et de sa finesse très élevée. Il est produit par la calcination d'une argile, qui est le kaolin. L'objectif de la calcination est de rendre ce matériau pouzzolanique par déshydroxylation. Le traitement thermique entraîne donc le passage d'une phase cristallisée et ordonnée (kaolinite) en une phase désordonnée (métakaolinite) par un effondrement du réseau cristallin [8]. Les températures sont suffisamment élevées de 600 à 900°C, pendant des durées suffisamment longues jusqu'à 5 heures de cuisson. La déshydroxylation peut être incomplète si le temps d'exposition n'est pas suffisant [9].

D'autre part les matériaux à base d'argiles calcinées comme la brique, la tuile et les céramiques sont souvent utilisés dans la construction. L'industrie de la maçonnerie ainsi que les sites de construction produisent des quantités importantes de déchets. En Algérie la maçonnerie en brique est la plus utilisée dans les chantiers. La brique est fabriquée à partir de la calcination d'un mélange d'argiles à une température de cuisson variant de 650°C à 1000°C. L'utilisation d'ajouts cimentaire à base de déchets de brique broyées, issus des briqueteries, des chantiers de construction ou de démolition permet de contribuer à la résolution du problème de stockage des déchets. Il en va de même pour la réduction de la pollution de l'environnement, ainsi que la préservation des ressources naturelles. L'idée conséquente est de substituer partiellement le ciment par des fines de brique recyclée. L'activité pouzzolanique des fines de brique est influencée par diverses propriétés physico-chimiques et chimiques telles que la teneur en phase amorphe, la teneur totale en silice, la composition chimique et minéralogique, la surface spécifique des grains, le degré de déshydroxylation, ainsi que la composition brute de la matière première [10 -13]. L'ajout de fines de brique dans les mélanges, peut favoriser la diminution du retrait des mortiers, l'amélioration de la structure des pores et le gain de résistance vis-à-vis des milieux agressifs et du gel-dégel [14-16].

En ce qui concerne les metakaolins, ils sont composés généralement de 50 à 55% d'oxyde de silicium et de 40 à 45% d'oxyde d'aluminium. C'est un mélange de particules aluminosiliceuses, principalement amorphes pouvant contenir des impuretés comme du quartz ou de la muscovite dégradée (illite) [9, 17]. De nombreux paramètres influencent la pouzzolanité des metakaolin comme la composition chimique et minéralogique, le degré de cristallinité, le coefficient d'amorphisation, la pureté et la teneur initiale en kaolin, le processus thermique de fabrication (température de calcination, durée), le processus post calcination (broyage, désagglomération), la morphologie des particules de MK (forme, degré d'agglomération, surface externe, surface totale, porosité intra-granulaire) et les caractéristiques du ciment utilisé

au travers de la formation d'hydroxyde de calcium [18]. Tous ces paramètres démontrent que la principale problématique des métakaolins est leur hétérogénéité.

Dans la majorité des travaux de recherche, menés sur les métakaolins, l'amélioration des performances des mortiers et bétons sont attribuées à l'effet pouzzolanique ainsi que l'effet filler apporté par l'incorporation du métakaolin. Physiquement par contre ils possèdent une surface spécifique pouvant être 100 fois plus grande que celle des ciments [19]. La question qui se pose alors est ainsi : es-que les principales propriétés des mortiers et bétons sont apportés par l'effet pouzzolanique ou par l'effet filler des metakaolins ? Dans un but de mieux contrôler l'effet des métékaolins, sachant que leur pouzzolanicité est hétérogène et dépendant d'un nombre important de paramètres, nous allons utiliser dans notre étude un métakaolin de pouzzolanacité faible, dans le but de mettre en évidence son effet filler par rapport à son effet pouzzolanique.

Les cimenteries de nos jours utilisent les fillers calcaire comme additif pour la fabrication du ciment [20]. La présence des fillers calcaire accélèrent l'hydratation du ciment par un effet chimique au jeune âge à travers la création de site de nucléation qui précipite plus rapidement les C-S-H [21- 22]. Les fillers calcaires (CaCO_3) réagissent avec les monosulfates ou les aluminates de calcium hydraté pour former des mono-carboaluminate de calcium [23]. Les carboaluminates raffinent le système des pores, ce qui influence la résistance à la compression.

Il serait intéressant alors d'ajouter aux ciments à base de filler calcaire des fines de brique issu du broyage des déchets de brique. Cet ajout apporte plus d'alumine dans la matrice cimentaire et favorise ainsi la création des carboaluminates. D'autre part il serait utile de prolonger les réactions d'hydratation à long terme par l'effet pouzzolanique qui peut être apporté par les fines de brique. Lorsque la température de calcination est adéquate. Elle permet alors d'obtenir un taux suffisant de silice amorphe et en conséquence une meilleure activation de l'argile.

Objectif du travail

Ce travail a pour but principal de valoriser l'utilisation des argiles calcinées comme addition cimentaire dans la fabrication des mortiers et bétons. De nombreux travaux ont déjà été réalisés sur l'effet de la substitution de ciment par du MK mais peu d'études se sont intéressées sur l'effet filler du MK.

L'objectif de cette étude est de valoriser un metakaolin local de faible pouzzolanicité et de mettre en évidence son effet physique par rapport à l'effet pouzzolanique. Cela pourrait garantir

un minimum de propriétés que peuvent apporter les metakaolins dans les mortiers et bétons, malgré leur diversité du point de vue chimique.

La performance d'un mortier à base de metakaolin a été analysée à travers des essais d'ouvrabilité et de résistance à la compression ainsi qu'à la flexion en jeune âge et à long terme. La durabilité a été évaluée à travers la résistance aux acides.

La performance du béton a été analysée à travers des essais de résistance à la compression à court et à long terme. Les essais de durabilité ont concerné l'absorption d'eau par capillarité, la pénétration d'eau sous pression ainsi que la perméabilité au gaz.

En ce qui concerne les briques, l'objectif est de recycler les déchets de brique dans les ciments. Les déchets de brique provenant d'une briqueterie locale ont été broyés au laboratoire à une finesse comparable à celle du ciment.

De nombreuses études ont traité l'effet des fillers calcaire sur le comportement des mortiers et bétons ainsi que leurs effets bénéfiques au jeune âge. Plusieurs chercheurs ont étudié de même, l'effet de l'incorporation des briques sur le comportement des matériaux cimentaires et leurs effets sur la durabilité. Rares sont les travaux de recherche qui ont traité l'effet de la présence en même temps des fillers calcaire et fines de brique dans les mélanges cimentaires quant à leur comportement hydraulique et mécanique à court et à long terme.

Dans notre étude nous substituons au ciment à base de filler calcaire, différents taux de fines de déchets de brique pour analyser leurs effets sur les pâtes et mortiers. Des essais ont été réalisés sur la consistance et le temps de prise des pâtes de ciment à base de fine de brique. Le comportement des mortiers a été évalué à travers des essais d'ouvrabilité, de microscopie, d'analyse thermique, de chaleur d'hydratation, de retrait, et de résistance à la compression et la flexion à court et long terme.

Plan de travail

Afin d'atteindre les objectifs mentionnés ci-dessus, notre thèse est structurée ainsi :

Une introduction générale est énoncée en premier lieu. Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique en rapport avec les ajouts utilisés et leur effet pour obtenir les différents types de ciments. L'hydratation du ciment à base de métakaolin. Les propriétés des mortiers et bétons à base de fines de déchets de brique à l'état frais et à l'état durcis ainsi que la durabilité.

Le deuxième chapitre concerne la partie expérimentale proprement dite. Elle est réalisée sur des éprouvettes en mortier et en béton. Une description détaillée des matériaux utilisés est rapportée. La procédure expérimentale adoptée est expliquée dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux sur la substitution de ciment par le métakaolin.

Le quatrième chapitre livre les résultats sur l'effet de la substitution de ciments par les fines de déchets de brique sur le comportement des différents matériaux cimentaires.

La conclusion regroupe les principaux résultats de cette étude ainsi que des recommandations pour de futurs travaux en continuité.

Chapitre I

Revue Bibliographique

I.1 Introduction

Les ajouts cimentaires sont largement utilisés de nos jours dans la formulation des différents types de bétons et mortiers. Ces ajouts cimentaires peuvent provenir des matériaux naturels, des sous-produits ou des déchets industriels. Parmi les ajouts les plus répandus dans l'industrie cimentaire, on peut citer les fillers calcaire, la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, la fumée de silice et les laitiers granulés des hauts fourneaux. Le métakaolin (MK) est aussi un ajout cimentaire naturel à caractère pouzzolanique. Le métakaolin est obtenu par la calcination de la kaolinite. Il est utilisé en tant qu'ajout cimentaire dans la fabrication des mortiers et bétons.

L'effet d'addition de MK et de l'argile calcinée sur la performance de mortier et béton est aussi discuté. Un autre ajout cimentaire commence à se généraliser, il s'agit de l'argile calcinée ou des fines de déchets de brique (DB).

Dans ce chapitre, nous présentons les différents procédés de production du métakaolin et de l'argile calcinée ainsi que les fines de déchets de brique. Les propriétés physiques et chimiques du MK et de l'argile calcinée sont ici revues.

I.2 Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés de bétons et mortiers

Les ciments avec ajouts offrent souvent de nombreux avantages par rapport aux ciments sans ajouts (CEM I). Ces avantages peuvent être des améliorations sur les propriétés chimiques, mécaniques ou physico-chimiques. L'amélioration peut être apportée par l'effet filler ou par l'effet pouzzolanique. L'effet filler, apporté par certains ajouts cimentaires comme les métakaolins ou les filler calcaires, contribue par un effet physique au remplissage des pores et améliore ainsi la granulométrie des mélanges dans les mortiers et béton. Cet effet de remplissage est un paramètre important qui participe notamment à l'amélioration de la durabilité par une réduction de la perméabilité. D'autre part, l'effet pouzzolanique apporté par certains ajouts comme la fumée de silice ou les laitiers de haut fourneau, améliore les propriétés de la matrice liante par une action chimique et physico-chimique. En effet la réaction pouzzolanique apportée par ces matériaux aura pour effet la baisse du taux de portlandite, l'augmentation des C-S-H, une meilleure densification de la matrice cimentaire, une augmentation de la résistance et une amélioration des paramètres de durabilité.

I.2.1 Les fillers calcaires

Les fillers calcaires se différencient entre eux par rapport à leurs origines, donc leur composition chimique et minéralogique ainsi que les taux d'impuretés qu'ils peuvent contenir. D'autres paramètres influencent aussi leur diversité comme la finesse, la porosité, l'état de surface, la dureté et la forme des grains. Plusieurs chercheurs ont montré que l'effet des fillers calcaire peuvent jouer un rôle fluidifiant. Leur capacité de remplissage des vides, chasse les particules d'eau et donc réduit la quantité d'eau nécessaire pour la fluidification des mélanges. Les fillers calcaires contribuent aussi à l'accélération de l'hydratation des ciments au jeune âge. Ils créent des sites de nucléation qui permettent une dissolution plus rapide des C_3S et la précipitation de plus de C-S-H. Leur effet à long terme est moins visible.

I.2.2 La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, qui additionnés au ciment peuvent réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment pour former d'autres hydrates plus stable (C-S-H). Ils peuvent alors améliorer les différentes propriétés des mortiers et bétons.

La pouzzolane est composée principalement de silice et d'alumine, elle peut être naturelle, d'origine volcanique généralement si elle possède des propriétés pouzzolaniques, ou, artificielle. Dans ce dernier cas un traitement thermique est nécessaire pour lui conférer ses principales propriétés pouzzolaniques. Les matériaux pouzzolaniques diffèrent entre eux par rapport à leur taux de pouzzolanicité qui dépend quant à lui de ses phases vitreuses et amorphe ainsi que des taux d'impuretés. Le taux de pouzzolanicité d'un matériau est sa capacité à fixer la portlandite et de réagir en présence d'eau pour former des hydrates plus stables.

I.2.3 la fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium. Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four. Il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 . Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. La fumée de silice est essentiellement composée de silice amorphe. Elle a une forme sphérique et sa dimension moyenne est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1 à 10 microns.

Les principales propriétés de la fumé de silice est son effet pouzzolanique rapide, qui peut apporter de meilleures résistances et des améliorations de durabilité dans les mortiers et bétons. L'effet filler

contribue à une meilleure compaction de la matrice cimentaire; cependant, l'aspect négatif de la fumée de silice est son coût qui est relativement élevé.

I.2.4 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules fines récupérées par les systèmes de dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Du point de vue composition chimique, elles peuvent avoir de grandes variations et cela dépend des impuretés que contient le charbon que l'on brûle dans les centrales thermiques. Du point de vue physique, les particules des cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes. Elles peuvent avoir une distribution granulométrique semblable aux ciments avec une forme sphérique. Ces sphères peuvent être creuses, ou contenir seulement des particules angulaires. Leur finesse est comprise entre 2500 et 6000 cm^2/g . L'incorporation de cendres volantes peut améliorer certaines propriétés des mortiers et bétons comme le retrait hydraulique et thermique. Elle peut réduire aussi la vulnérabilité des bétons vis-à-vis des solutions agressives en fixant progressivement la chaux.

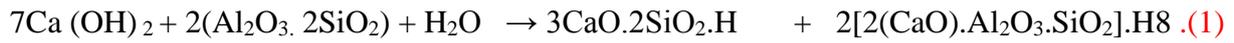
I.2.5 Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé, est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi. Il s'agit d'un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium de l'ordre de 40% à 50 %, de la silice entre 25% à 35%, de l'alumine de 12% à 30% ainsi que du magnésium et d'autres oxydes en très faibles quantités. Tous ces éléments ressemblent beaucoup à ceux du clinker.

Les laitiers peuvent être introduits dans les matrices cimentaires par différents taux de substitution. Les laitiers peuvent améliorer la durabilité des mortiers et béton grâce à leur capacité de fixation de la chaux. Ils procurent aussi une meilleure résistance vis-à-vis des attaques chimiques.

I.2.6 Hydratation des ciments pouzzolaniques

La réaction pouzzolanique se produit entre les produits d'hydratation du ciment et l'ajout cimentaire à caractère pouzzolanique. La silice et l'alumine provenant de l'ajout cimentaire activé, se combinent avec la portlandite provenant de l'hydratation du clinker broyé, pour former de nouveaux silicates de calcium hydratés (C-S-H). Cette réaction peut s'écrire selon la formule (1) [35]:



(Portlandite) (Pouzzolane) (Eau) silicate de calcium hydratée alumino-silicate de calcium hydratée

I.3 Métakaolin

I.3.1 Production du métakaolin

La production du métakaolin se réalise par la calcination d'une argile, qui est le kaolin. L'objectif de la calcination est de rendre ce matériau pouzzolanique par déshydroxylation. L'effet de la calcination commence à apparaître à partir de 550 à 600°C. Il en résulte la métakaolinite. Le traitement thermique entraîne donc le passage d'une phase cristallisée et ordonnée (kaolinite) en une phase désordonnée (métakaolinite) par un effondrement du réseau cristallin. Après l'évaporation de l'eau adsorbée entre les feuillets d'argile ($T > 100^\circ\text{C}$), la phase de déshydroxylation (perte des groupements hydroxyles liés physiquement aux feuillets d'argile qui se produit entre 700 et 800°C) engendre une destruction de la structure cristalline du kaolin qui ne se recristallise pas [24].

Il existe deux types de calcination employés par l'industrie pour produire le métakaolin :

- Calcination lente dite à lit fixe

Pour ce type de calcination la crue de Kaolin est préalablement séchée, puis broyée très finement ($D_{\text{max}} = 20 \mu\text{m}$). La calcination est menée lentement au four afin d'obtenir une déshydroxylation complète du kaolin. Les températures sont suffisamment élevées de 600 à 800°C, pendant des durées suffisamment longues, jusqu'à 5 heures de cuisson [9].

- Calcination flash

Dans ce cas, la calcination est très rapide, le chauffage et le refroidissement sont de l'ordre de quelques dixièmes de secondes. Les différentes transformations peuvent ne pas être achevées. La déshydroxylation peut être incomplète si le temps d'exposition n'est pas suffisant. Le chauffage et le refroidissement très rapides empêchent l'eau évaporée sous l'effet de la chaleur de s'échapper correctement. Les particules se modifient alors et, sous l'effet de la pression, libèrent des bulles de vapeurs. Les particules auront par conséquent un aspect troué ou bulleux. Les propriétés des solides préparés par cette méthode sont différentes de celle de matériaux

traités dans des conditions de calcination lente où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint [9].

I.3.2 Composition chimique et finesse du MK

La composition chimique des métakaolins ne se présente pas toujours pure. Elle dépend des taux d'impuretés que peuvent contenir les mélanges. Ils sont composés généralement de 50% à 55% d'oxyde de silicium et de 40% à 45% d'oxyde d'aluminium [9]. C'est un mélange de particules alumino-siliceuses, principalement amorphes (dépendant de la procédure de calcination), pouvant contenir des impuretés comme du quartz ou de la muscovite dégradée (illite).

Physiquement ils possèdent une granulométrie ultra fine avec un D_{50} compris entre 1 et 20 μm , et une masse volumique comprise entre 2.5 et 2.6 g/cm^3 . La surface spécifique peut être 100 fois plus grande que celle des ciments. Elle est comprise entre 100 000 cm^2/g jusqu'à 300 000 cm^2/g [19]. Il est trouvé différentes formes de grains. Ils peuvent être sphérique ou de forme plus complexe. La finesse très élevée des métakaolins, influence leur réactivité avec le ciment lors de l'hydratation ainsi que le comportement rhéologique des mortiers et bétons.

I.3.3 Pouzzolanité du MK

Un matériau pouzzolanique, est un matériau qui réagit avec l'hydroxyde de calcium pour produire des hydrates de type siliceux, ou silico alumineux possédant des propriétés liantes.

L'hydroxyde de calcium peut provenir de l'hydratation de ciment portland ou de la présence de chaux hydratée. Il est possible d'estimer la pouzzolanité d'un matériau selon l'essai Chapelle, qui consiste à mesurer la quantité d'hydroxyde de calcium consommée.

Le **tableau I-1** montre que le métakaolin possède une haute réactivité pouzzolanique, comparé aux autres ajouts cimentaire à caractère pouzzolanique.

Tableau I.1 : Taux de réactivité pouzzolanique de différents matériaux [9]

Réactivité pouzzolanique (mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / g de matériau)				
Bauxite calcinée	Fumée de silice	Laitier de haut fourneau	Cendres volants	Métakaolin
534	427	300	875	1000

I.4 Influence du métakaolin sur l'hydratation du ciment

Lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau, les produits d'hydratation sont composés de 20% à 30% d'hydroxyde de calcium (CH). Ce dernier participe peu à la résistance de même qu'il est peu stable. Sa carbonatation provoque une élévation de la porosité. Cependant, lorsque le métakaolin est mélangé au ciment, une réaction pouzzolanique se produit lors de l'hydratation. Elle consiste en une dissolution entre la silice et l'alumine provenant du métakaolin ainsi que la portlandite provenant de l'hydratation du clinker. Elle aura pour conséquence la précipitation des silicates de calcium hydratés.

Les silicates de calcium hydratés participent grandement au développement des résistances mécaniques ainsi qu'à la densification de la matrice cimentaire [25-29]. Les réactions se produisent comme suit :



(gypse) (ettringite)



(monosulfate)



La stœchiométrie de la réaction pouzzolanique est donnée par l'équation suivante :



Où $C_5AS_2H_{10}$ est une composition moyenne représentant un mélange de C-S-H (silicate de calcium hydraté dit secondaire), C_4AH_{13} , C_3AH_6 (hydrogrenat), et C_2ASH_8 (straetlingite) [5].

La réaction pouzzolanique est influencée par la pureté initiale du kaolin, le processus post calcination (broyage, désagglomération...,ext), la température et la durée de calcination qui peuvent engendrer différents degrés de cristallinité et de coefficient d'amorphisation. Il en va de même de la morphologie des particules de MK (forme, degré d'agglomération, surface externe, surface totale, porosité intra-granulaire) et enfin des propriétés du ciment utilisé [30, 31].

La cinétique de la réaction pouzzolanique est influencée à court terme par les surfaces externes des particules du MK et à long terme par l'indice d'agglomération. Le métakaolin peut aussi jouer un rôle d'accélérateur d'hydratation par une dissolution plus rapide des C_3S du ciment, en raison de la grande finesse du métakaolin qui contribue à la création de plusieurs sites de nucléation propice au développement des produits d'hydratation [32-34].

I.5 Fines de brique d'argiles cuites

Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles. La température de cuisson est comprise entre $750^{\circ}C$ et $1000^{\circ}C$ selon le type d'argile et la résistance recherchée.

La cuisson se fait dans un four continu de type four tunnel. Durant la phase de préchauffage l'humidité des briques est éliminée. A partir d'une température comprise de $450^{\circ}C$ et $600^{\circ}C$ se produit le "point de quartz" : il s'agit de la température à laquelle la structure cristalline du quartz est modifiée. A cette étape de la cuisson, les briques sont très sensibles à la formation de fissures.

Enfin, la dernière phase consiste à refroidir les briques. Cette opération doit s'effectuer de façon très contrôlée pour éviter tout risque de fissuration. La fissuration liée aux deux dernières phases donne lieu à 10% à 15% de briques rejetées qui peuvent être recyclées.

L'humidité ainsi que l'eau absorbée sont évaporées à des températures allant jusqu'à $100^{\circ}C$. Les briques fabriquées à partir d'argile Illite libèrent l'eau adsorbée à partir de $300^{\circ}C$. Entre $400-450^{\circ}C$ l'eau liée chimiquement est libérée et la déshydroxylation de minéraux argileux se produit entre les températures de $450-700^{\circ}C$. Pendant l'évaporation de l'eau des minéraux argileux, le réseau cristallin se désorganise, tandis qu'un composé anhydre de structure amorphe est produit. Entre $400-1000^{\circ}C$ des modifications réversibles et irréversibles se produisent (décomposition de sulfates, de carbonates, d'oxydes et d'autres impuretés). Les phases vitreuses sont formées à des températures supérieures à $900^{\circ}C$. La nucléation et la cristallisation de nouvelles phases se produit à des températures supérieures $1000^{\circ}C$. Le frittage et la dissolution de certaines phases dans la masse fondue se produisent à des températures supérieures à $1100^{\circ}C$; les impuretés organiques et carbone dans la plage de température de 300 à $1040^{\circ}C$ [11].

I.6 Intérêt de l'utilisation des déchets de brique dans la construction

L'industrie de la brique et de la tuile produit un grand nombre de rejets en raison de ces unités qui peuvent être cassées, déformées, ou surcuites. Ce matériau est le plus souvent déversé dans les sites autour des briqueteries. La Belgique produit chaque année environ 1000 kg de déchets de démolition et de construction par habitant. Cette masse de gravats se compose de 41% de maçonnerie [37]. En France par exemple 34% de l'ensemble des déchets est issu de la brique, tuile, céramique et béton (Figure I.1).

Les travaux de recherche sur l'utilisation des déchets de brique ont été menés depuis 1928 particulièrement entre les années 1940 et 1950 [14]. En Allemagne, après la seconde guerre mondiale, la nécessité d'enlever les décombres, a conduit à la mise en place d'une usine de recyclage de gravats. Il a été rapporté que vers la fin de l'année 1955, environ 11.5 million m³ de déchets de brique ont été utilisés par ces usines de recyclage Allemandes pour la construction de 175.000 logements [38].

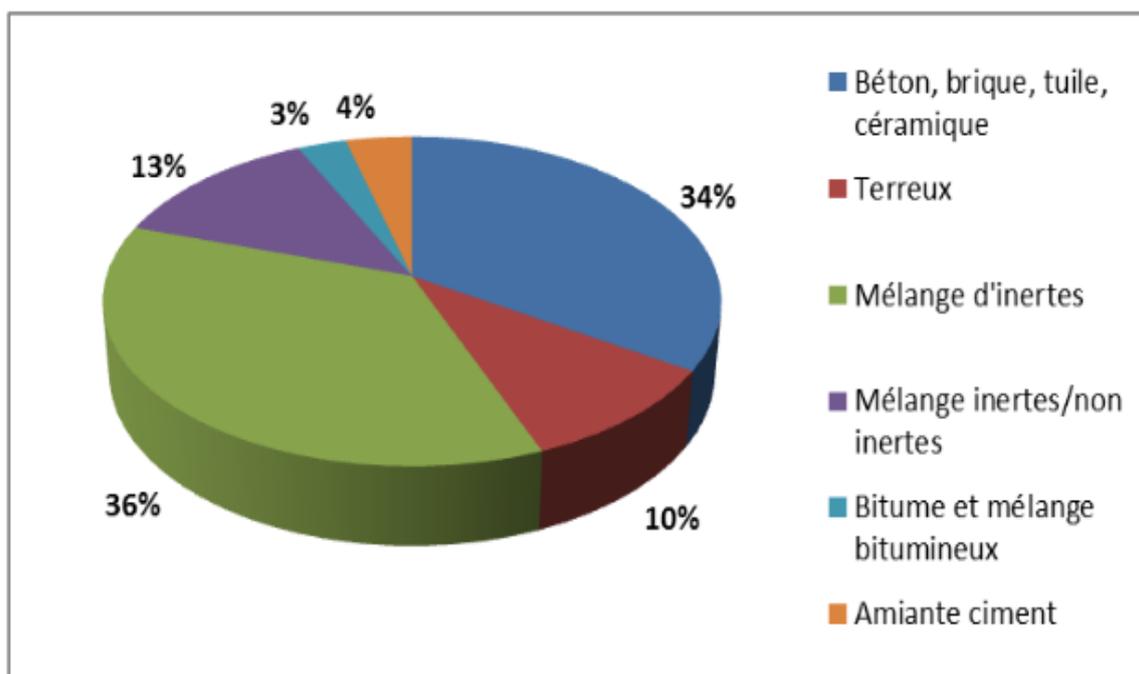


Fig I.1: Proportion des différents déchets en France [36].

Les déchets de brique peuvent être utilisés dans la matrice cimentaire comme un substituant partiel au ciment ou dans le squelette granulaire comme remplaceant partiel des granulats. Dans les deux cas, la surface spécifique Blaine ou le module de finesse doivent être contrôlés avant leur addition dans les différents mélanges.

Bektas et all [14] ont substitué partiellement le sable par des déchets de brique pour la fabrication de mortiers. Le broyage de la brique a été effectué de sorte qu'elle passe à travers un tamis de 4.75 mm. Le module de finesse finale obtenu du sable de rivière et de la brique été respectivement de 3.01 et 3.51.

O'Farrell et all [16] ont utilisé les déchets de brique ayant une surface spécifique de 320 ± 350 kg/m² comme substitution partielle de ciment à différents taux de substitution,

I.7 Effet des déchets de brique sur l'ouvrabilité

Les matériaux d'origine argileuse possèdent des capacités d'adsorption, qui dépendent plus au moins d'un certain nombre de paramètres.

La figure I.2 montre que la tendance de perte de fluidité est presque linéaire pour des taux remplacement de sable en déchets de brique respectivement de 0%, 10%, 20% et 30%.

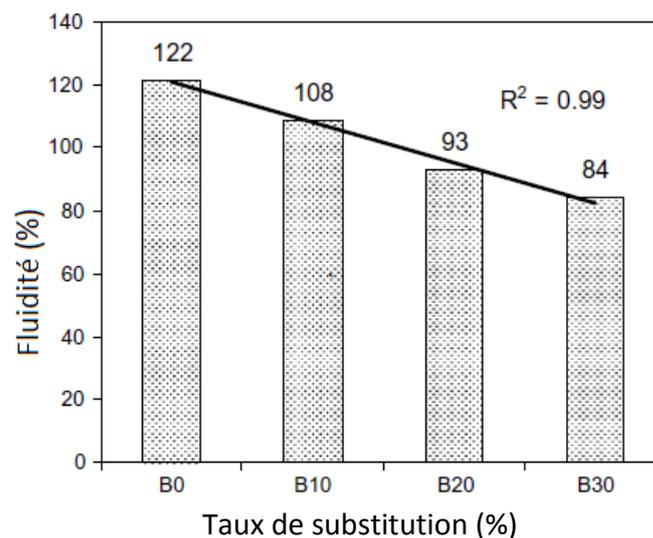


Fig I.2 : Fluidité des mortiers à base de différents taux de substitution de sables par les DB

[14].

Il est évident que la grande capacité d'absorption de la brique en eau diminue significativement la fluidité des mortiers. La brique est un matériau qui contient des pores, dont la porosité peut atteindre 40% en fonction de la matière première et des processus de fabrication [14]. En conséquence, les granulats qui seraient fabriqués à partir de briques posséderont alors une absorption d'eau élevée.

Debieb et Kenai [37] ont remplacé le sable naturel avec des déchets de brique dans le béton à différents taux de substitution (0%, 25%, 50%, 75% et 100%). Ils ont également trouvé que la consommation en eau augmente avec l'augmentation de la substitution du sable par les déchets de brique pour une ouvrabilité constante.

I.8 Effets des déchets de brique sur la résistance à la compression

Bektas et al [14] montrent que les déchets de brique utilisés comme substitution partielle aux granulats jusqu'à 20% ne provoquent pas de perte de résistance sur les mortiers (Figure I.3), particulièrement à long terme.

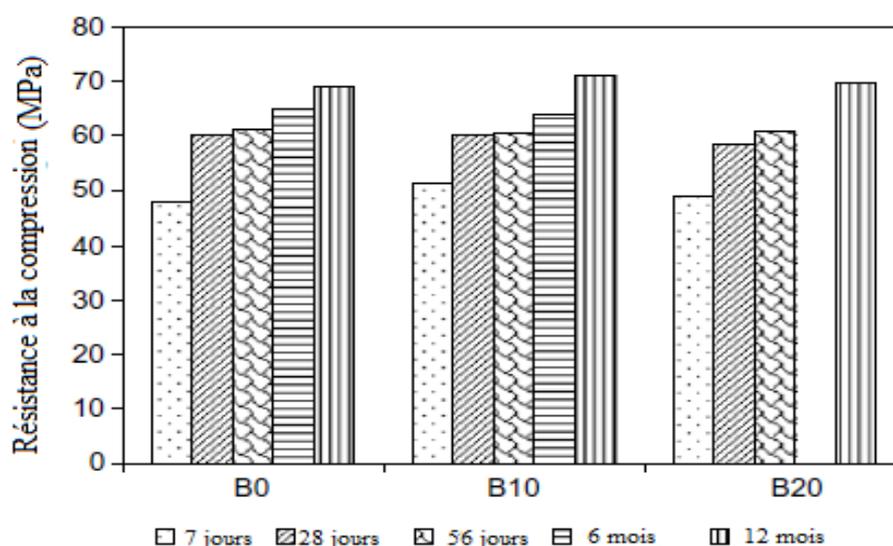


Fig I.3 : Effet des déchets de brique sur la résistance à la compression des mortiers [14].

Khatib [52] a rapporté que le taux de substitution de 25% des agrégats par la brique produit la même résistance que celle du béton de référence. Le ratio à 28 jours était seulement de 0.84; le gain de résistance entre 28 et 90 jours a été attribué à l'action pouzzolanique fournie par les parties très fines de la brique.

Dans une autre étude, Debieb et Kenai [37] ont observé qu'il y a une chute de résistance qui varie de 5% à 10% pour un taux de substitution en déchets de brique de 25%. La chute de

résistance est de 30% pour une substitution totale de granulats en déchets de brique. Cette diminution de résistance, a été attribuée à l'existence de vieux mortier collé sur les granulats de déchets de brique ainsi qu'à la structure poreuse des granulats de brique qui conduit à une grande consommation en eau, provoquant ainsi la chute de la résistance à la compression.

D'autres chercheurs appuient également ces résultats [37, 39, 40]. Peu de travaux montrent que l'incorporation de la brique dans le béton produit une augmentation de la résistance à la compression [41].

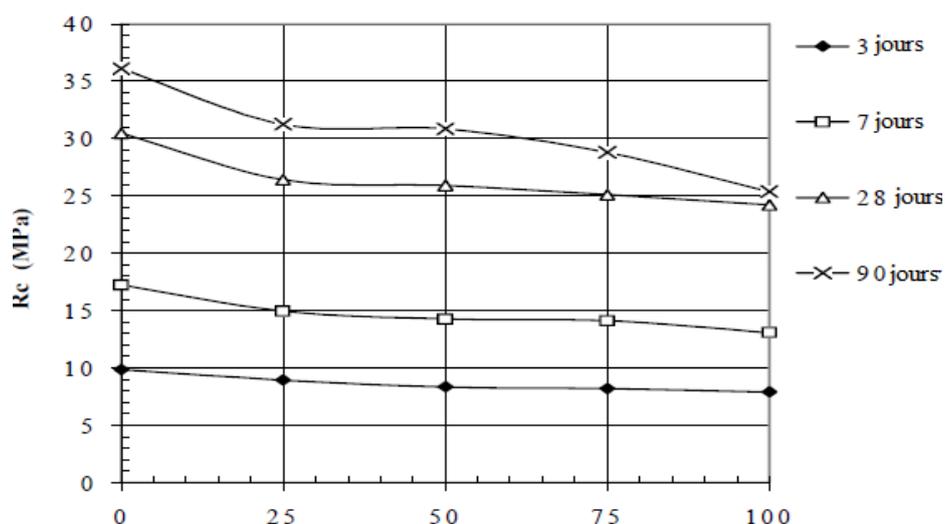


Fig I.4 : Effet des déchets de brique sur la résistance à la compression des bétons [37].

I.9 Effet des déchets de brique sur le retrait

Le retrait de dessiccation attire le plus souvent une préoccupation particulière pour le béton fabriqué avec des agrégats recyclés, donc poreux. La figure I.5 montre les résultats de l'essai de retrait effectué sur du mortier.

Bektas et al. [14] trouvent que le mortier contenant 10% de déchets de brique provoque la plus forte contraction, tandis que le mortier contenant 20% de déchets de brique conduit à la plus faible valeur de retrait. Néanmoins, l'écart entre les différents résultats est relativement faible.

Khatib [52] révèle que plus le taux de substitution en déchets de brique augmente et plus le retrait est réduit. Cela a été expliqué par une création d'un gel pouzzolanique qui imbibe de l'eau. Les particules de brique peuvent favoriser le durcissement du béton ou du mortier : il maintient l'eau initialement absorbée du mélange dans les pores de la brique pour des périodes plus longues et par conséquent, l'hydratation continue et le retrait de dessiccation sera retardé

en raison de la présence d'humidité interne [42]. Le phénomène de retrait mérite une enquête plus approfondie pour nombre de chercheurs.

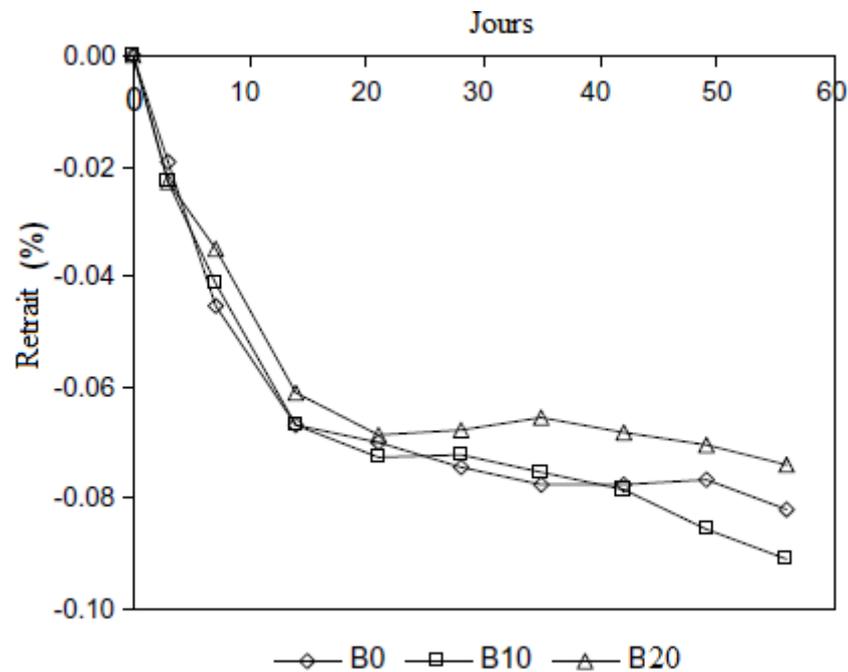


Fig I.5 : Effet des déchets de brique sur le retrait des barres de mortier [14].

I.10 Effet des déchets de brique sur le gel-dégel

La figure I.6 présente les courbes de dilatation des échantillons de mortier soumis aux cycles de gel-dégel.

Les éprouvettes de mortier ont subi une cure de 28 jours dans l'eau avant d'être exposées aux cycles de gel-dégel. La figure I.6 démontre clairement que le taux de substitution de 20% en brique réalise la meilleure performance, ce qui fait que plus la quantité de brique augmente, plus la dilatation causée par les cycles de gel-dégel diminue. Après 180 cycles, le taux de substitution de 20% en déchets de brique provoque une expansion moyenne de 0.05% en comparaison à 0.53% pour les mortiers de référence.

L'idée sous-tendant l'inclusion de bulles d'air, est de soulager le béton de la pression causée par la formation de glace et d'éviter la fissuration due à la congélation-décongélation. En d'autres termes, la création de vide à travers les bulles d'air dans la structure du béton évite l'apparition de fissure lors d'un déroulement d'un mécanisme expansif.

La nature extrêmement poreuse de la brique peut fournir une action similaire aux entraîneurs d'air et de réduire ainsi l'expansion due au gel-dégel. Ce concept est appliqué avec succès par Litvan et Serada [43]. Dans leur étude, la résistance du béton au gel-dégel a été améliorée par l'incorporation de particules de brique poreuses, avec un diamètre de pores de $0.5 \pm 0.08\text{mm}$. Les échantillons contenant 16% de particules de brique ont enduré 1260 cycles gel-dégel sans endommagement.

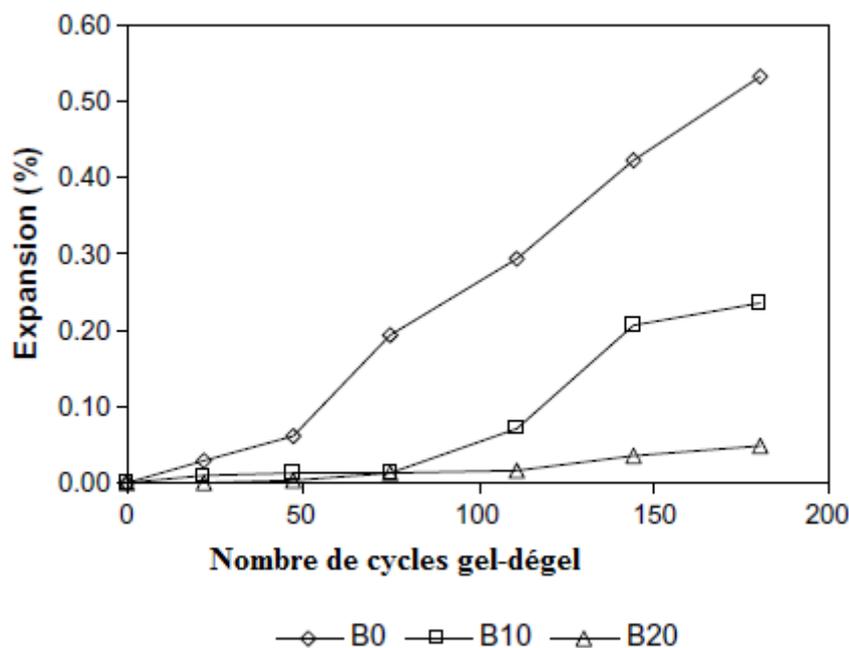


Fig I.6 : Expansion du mortier soumis aux cycles gel-dégel [14].

I.11 Effet de l'eau de mer sur les mortiers et bétons à base de briques

Les matériaux à base de ciment qui sont exposés à l'eau de mer sont soumis à divers types d'attaques physiques et chimiques. L'attaque chimique est principalement attribuée à la présence de chlorures et des sulfates [16].

L'expérience montre que l'attaque chimique des matériaux cimentaires lorsqu'ils sont exposés à l'eau de mer est plus complexe que ceux qui sont exposés aux sulfate de sodium, à cause du nombre important de sels dissous qui sont présents. L'eau de mer contient des chlorures de sodium, chlorures de magnésium, des bicarbonates de potassium, et surtout du magnésium, ainsi que les sulfates de calcium et du gypse. D'une part la combinaison des sulfates de l'eau de mer avec l'hydroxyde de calcium (CH) (produit par l'hydratation du ciment) et d'alumine présent dans le ciment conduit à la formation d'ettringite. La présence d'ions de magnésium

d'autre part dans la solution entraîne également la formation de composés nuisibles supplémentaires [16].

L'action chimique de l'eau de mer sur le béton provient du fait qu'elle renferme un certain nombre de sels dissous. La salinité totale d'une eau de mer est habituellement de 3.5%. Dans toutes les mers, la proportion relative des différents sels est pratiquement constante. Par exemple, dans l'océan Atlantique, la concentration ionique est la suivante : chlore 2%, sulfate 0.28%, sodium 1.11%, magnésium 0.14%, calcium 0.05% et potassium 0.04%. L'eau de mer contient aussi du CO₂ dissout. Les zones côtières étroites en climat chaud, où l'évaporation est grande, peuvent être très salées. La mer morte constitue un cas extrême : avec une salinité de 31.5%, c'est à dire presque 9 fois celle des océans, mais sa concentration en sulfate est plus faible que dans les océans [44].

La présence d'une grande quantité de sulfate dans l'eau de mer provoque une attaque par les sulfates. En effet, les réactions entre les ions sulfate et à la fois le C₃A et les C-S-H se développent, entraînant la formation d'étringite. Cette réaction n'est pas associée à une expansion destructrice, car l'étringite, tout comme le gypse, sont solubles en présence de chlorure et peuvent être lessivés par l'eau de mer [44]. Il en résulte que l'emploi d'un ciment résistant aux sulfates dans un béton exposé à l'eau de mer n'est pas essentiel, mais une limite de 8% de C₃A est recommandée lorsque la teneur en SO₃ est inférieure à 3% [45]. L'excès de SO₃ qui semble conduire à une expansion tardive du béton. Les mêmes essais [45] ont confirmé que le C₄AF contribue aussi à la formation d'étringite, de sorte que les exigences de la norme ASTM C 150-94, qui limite à 25% la quantité de 2C₃A + C₄AF dans le clinker, doivent être respectées.

Les commentaires et exigences précédentes s'appliquent au béton constamment immergé dans l'eau, ce qui représente des conditions d'exposition relativement peu sévères [45], car un état stable de saturation et de concentration en sels est atteint de sorte que la diffusion des ions est extrêmement réduite. Les cycles alternés de séchage et de mouillage constituent une condition bien plus sévère. Les sels peuvent s'accumuler à l'intérieur du béton par suite de pénétration de l'eau de mer qui s'évapore sous forme d'eau pure laissant les sels précipiter. Il est donné que l'effet le plus néfaste de l'eau de mer sur les structures en béton provient de l'action des chlorures sur les armatures d'acier.

L'action chimique de l'eau de mer sur le béton est la suivante. Les ions magnésium contenus dans l'eau de mer se substituent aux ions calcium comme suit :



Le $\text{Mg}(\text{OH})_2$ formé, appelé brucite, précipite dans les pores à la surface du béton en constituant une couche de surface protectrice qui empêche la réaction de se poursuivre. On peut aussi trouver un peu de CaCO_3 précipité sous forme d'aragonite, dû à la réaction du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec le CO_2 . Les dépôts précipités, habituellement de 20 à 50 μm d'épaisseur, se forment rapidement [46]. Ils ont été observés dans un certain nombre de structures marines complètement immergées. Etant donné sa nature qui tend à colmater les pores du béton, la formation de brucite s'arrête d'elle-même.

Il a été montré que la perte de résistance est beaucoup plus importante que l'expansion pour les mortiers exposés à l'eau de mer [47, 48], qui est attribué à la décomposition du gel C-S-H.

L'utilisation de la pouzzolane, en substitution partielle du ciment, est en général favorable à l'amélioration de la résistance du mortier ou béton à l'attaque des sulfates. L'effet chimique principal de la pouzzolane lorsqu'il est présent dans le mortier, est l'élimination de l'hydroxyde de calcium conséquence de l'hydratation du ciment, ce qui va empêcher la formation d'ettringite nuisible à la matrice cimentaire [49].

O'Farrell et al. [16], utilisent quatre différents types de brique (B, D, L, et P) en substitution partielle du ciment (0%, 10%, 20% et 30%) et chaque type de brique a été testé par l'évaluation de l'expansion ainsi que la perte de résistance des mortiers immergés dans de l'eau de mer jusqu'à une période de 560 jours (Figure I.7).

Ils constatent que les déchets de brique ont une grande influence sur l'expansion des mortiers exposés à l'eau de mer. L'expansion est réduite par rapport au mortier témoin pour les différents types de déchets de brique et plus le taux de substitution du ciment par la brique augmente et plus l'expansion diminue; sauf pour la brique de type D ou c'est l'inverse qui s'est produit pour les taux de substitution de 20% et 30%. Par contre, le taux de 10% semble donner de bons résultats. Cela a été expliqué par la composition de la brique de type D, qui semble favoriser l'expansion, et par conséquent réduit la durabilité.

En ce qui concerne l'augmentation du poids des éprouvettes, les résultats sont similaires par rapport à ceux de l'expansion (Figure I.8).

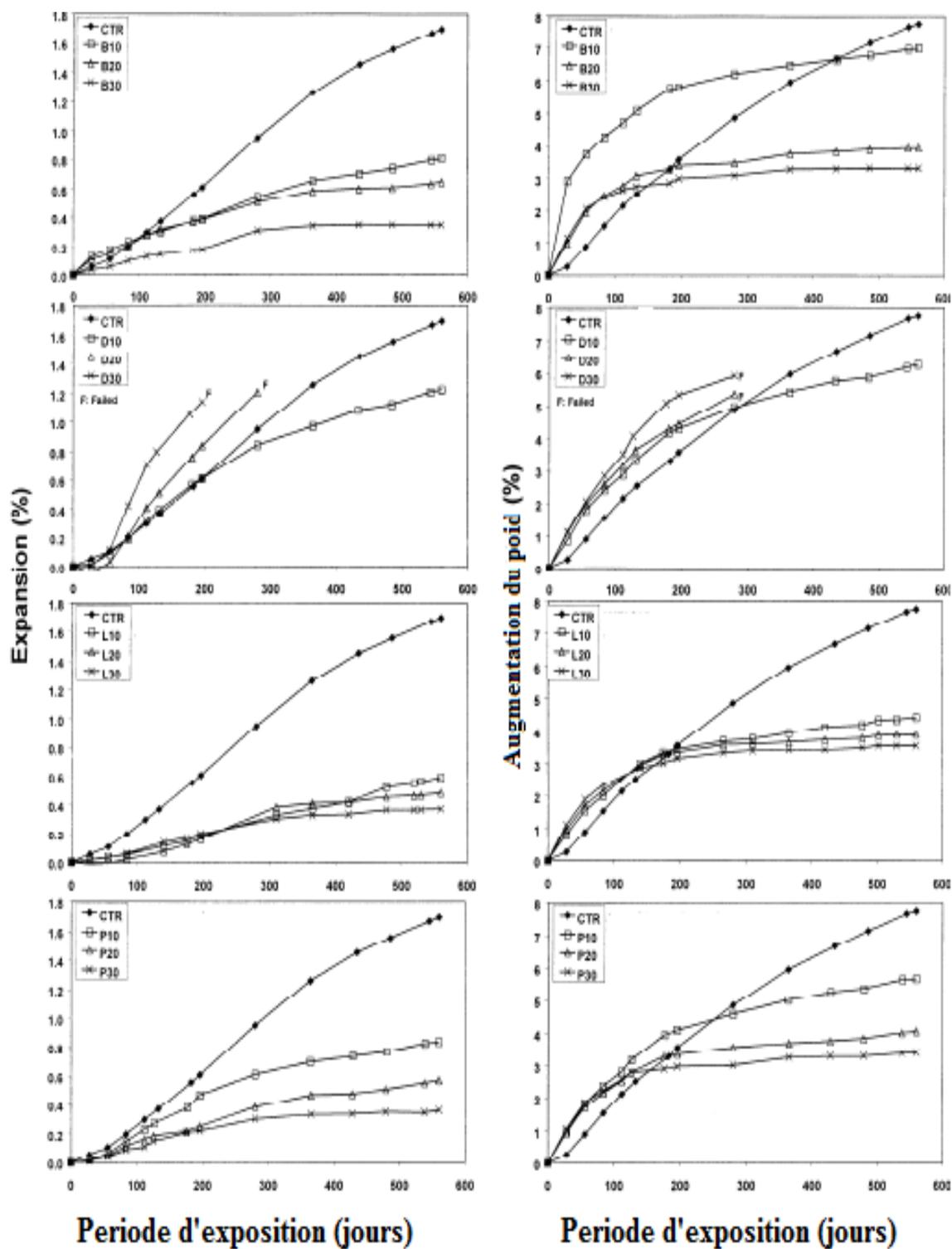


Fig I.7 : Expansion et variation du poids des mortiers à base de brique [16].

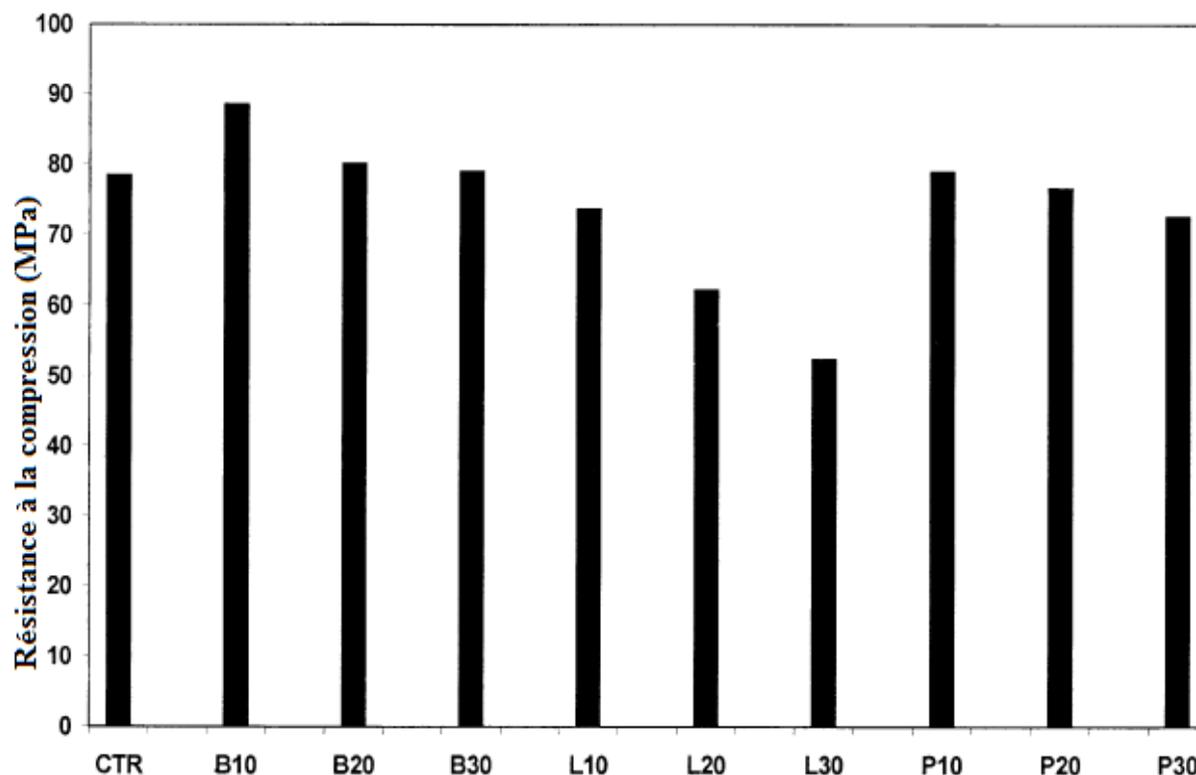


Fig I.8 : *Résistance à la compression des mortiers à base de brique, exposé à l'eau de mer pendant une durée de 560 jours [16].*

L'effet de l'eau de mer sur la résistance à la compression des mortiers est très sévère. Il existe une augmentation de la perte de résistance en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par la brique.

Il a été signalé aussi qu'un faible taux d'expansion ne correspond pas forcément à une meilleure résistance à la compression. Ceci est clairement observé pour le L20 et le L30 bien que ces dernières ont abouti à la plus petite expansion, ils n'ont pas produit la plus faible chute de résistance [16].

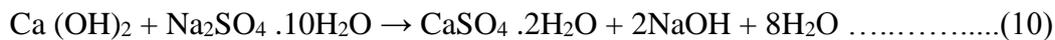
I.12 Effet des sulfates de sodium sur les mortiers et bétons à base de brique

Les sels solides n'attaquent pas le béton, mais, lorsqu'ils sont en solution, ils peuvent réagir avec la pâte de ciment hydraté. On trouve très fréquemment du sulfate de sodium, de potassium, de magnésium et de calcium dans les sols et les eaux souterraines. Etant donné que la solubilité du sulfate de calcium est faible, les eaux souterraines chargées en sulfate contiennent plutôt les autres types de sulfate, que le sulfate de calcium.

Ces autres sulfates réagissent non seulement avec le Ca(OH)_2 , mais aussi avec les différents produits de l'hydratation du ciment.

Les sulfates contenus dans les eaux souterraines sont habituellement d'origine naturelle mais ils peuvent aussi provenir de fertilisants ou d'effluents industriels. Ceux-ci contiennent par fois du sulfate d'ammonium qui réagit avec la pâte cimentaire hydratée pour former du gypse [44]. Les réactions chimiques de ces sulfates avec la pâte de ciment durci sont les suivantes :

Le sulfate de sodium attaque le Ca(OH)_2 :



Ce qui constitue une attaque de type acide. Sous de l'eau ruisselante, le Ca(OH)_2 peut être complètement lessivé, mais si le Na(OH) s'accumule, l'équilibre est atteint, une partie seulement du SO_3 précipite sous forme de gypse.

Par ailleurs, le sulfate de magnésium attaque les silicates de calcium hydraté (C-S-H) aussi bien que le Ca(OH)_2 et les aluminates de calcium hydraté (C-A-H). La réaction est du type :



Etant donné la très faible solubilité du Mg(OH)_2 , cette réaction se produit jusqu'à ce qu'elle soit terminée de sorte que, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates. Une réaction ultérieure entre le Mg(OH)_2 et le gel de silice est possible et peut aussi provoquer une détérioration. La conséquence finale de l'attaque au sulfate de magnésium est la destruction des C-S-H [44].

O'Farrel et al. [50], ont mesuré l'expansion des différents mortiers à base de quatre types de brique (B, D, L, P) immergés dans une solution de sulfate de sodium à une concentration de (2.1%) jusqu'à une période de 560 jours (Figure I.9).

Il a été constaté que le taux de substitution ainsi que le type des déchets de brique influence considérablement l'expansion des mortiers. Il y'a une diminution d'expansion pour les déchets de brique de type B et L par rapport au mortier témoin pour les différents taux de substitution de ciment par la brique. L'expansion des mortiers à base de déchets de brique type P est supérieur par rapport au mortier témoin pour un taux de substitution de 10% de ciment en brique.

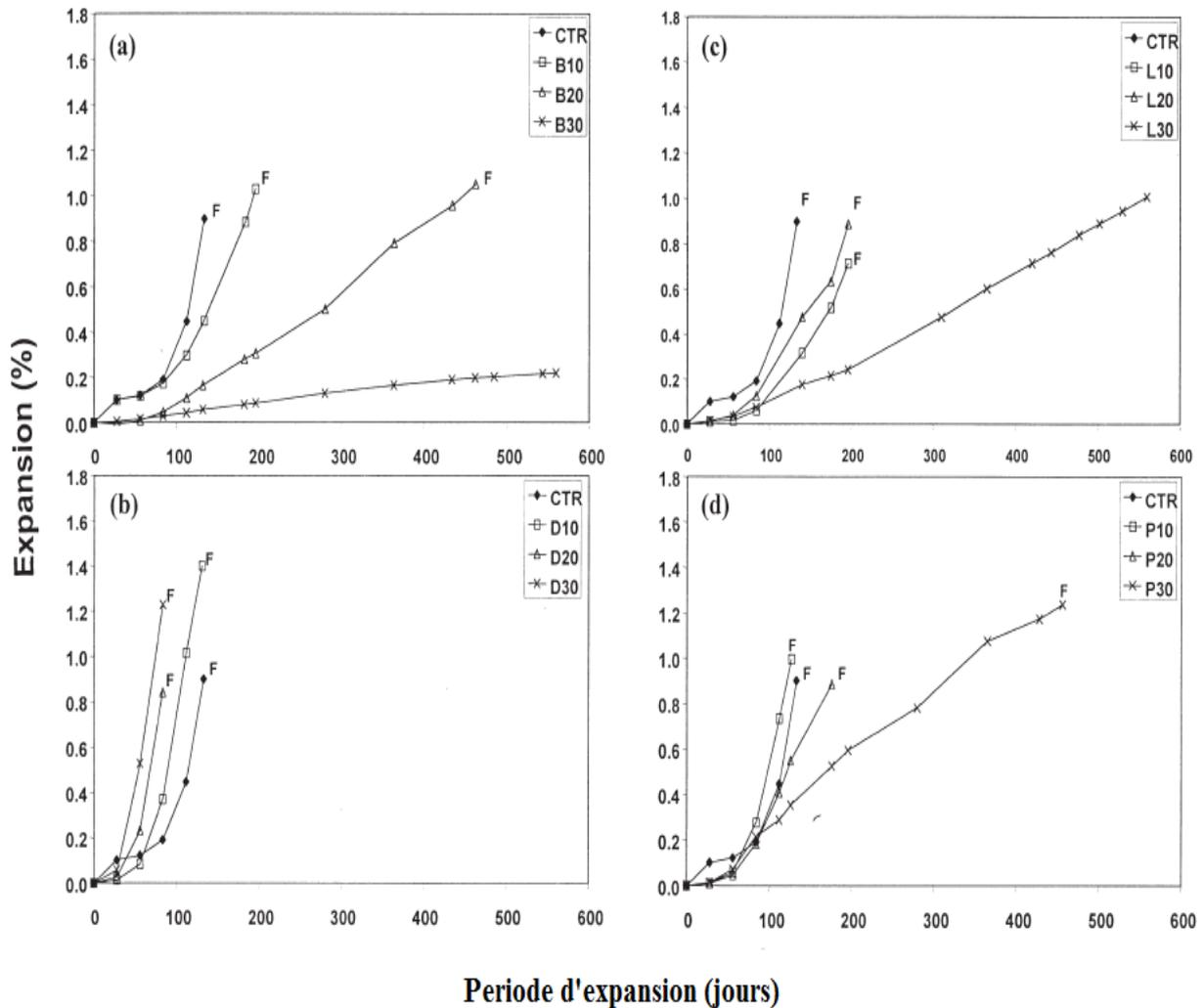


Fig I.9 : Expansion de mortiers contenant différents types de déchets de brique [50].

Toutes les compositions des mortiers (F, B, L, P) montrent que la tendance d'expansion diminue avec l'augmentation du taux de substitution de 10% à 30% sauf pour les mortiers à base de déchets de brique de type (D) où la tendance d'expansion s'inverse. Plus le taux de substitution de ciment en brique augmente et plus l'expansion augmente par rapport au mortier témoin.

À 560 jours, il a été observé que deux mortiers à base de déchets de brique qui sont (B et L) avec un taux de substitution de 30% de ciment en brique présentent la plus grande résistance à l'expansion à moins du quart par rapport à celle du mortier témoin (Fig I.10).

Ces résultats montrent que les courbes d'expansion vont dans le même sens que celle de la variation du poids des éprouvettes, voire qu'elles sont presque identiques. Cela prouve qu'il existe une corrélation très étroite entre l'expansion et l'augmentation de poids des mortiers à base de déchets de brique exposés aux sulfates de sodium en fonction du temps [53].

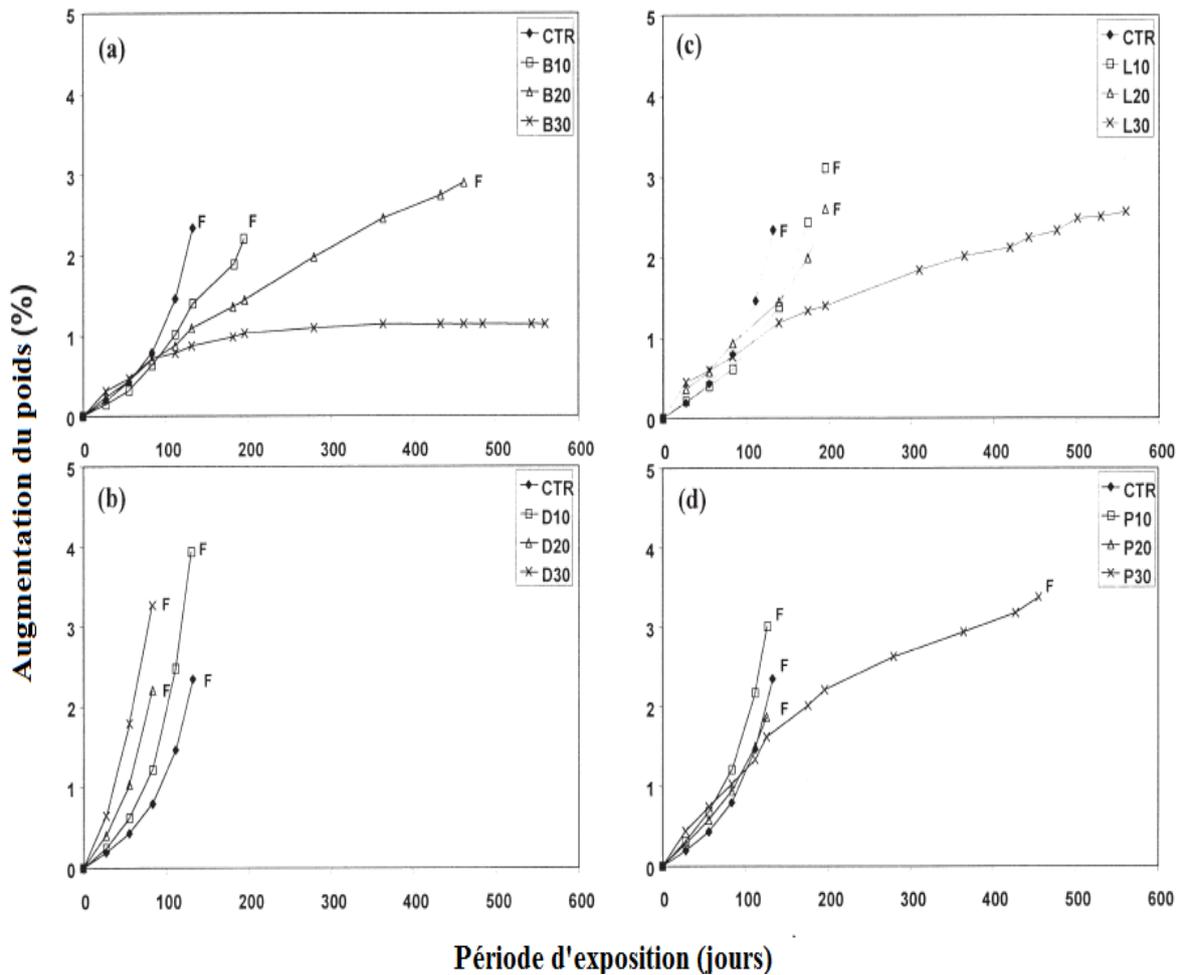


Fig I.10 : Augmentation du poids des mortiers contenant différents types de déchets de brique [50].

La figure I.11 montre la corrélation entre l'expansion et l'augmentation du poids des éprouvettes. Cette courbe confirme clairement qu'il existe une forte corrélation entre l'expansion et l'augmentation du poids des mortiers à base de déchets de brique exposé aux sulfates de sodium. Cette étroite corrélation fournit une preuve que le facteur d'augmentation du poids est également à l'origine de l'expansion.

L'expansion excessive apparue dans les mortiers à base de brique de type B et D a été expliquée par la présence du CaO dans la brique qui ne se combine pas avec les sulfates par rapport aux autres mélanges. Par contre, le CaO combiné au sulfate réduit l'expansion du mortier et la pouzzolanicité de la brique devient ainsi plus efficace [50].

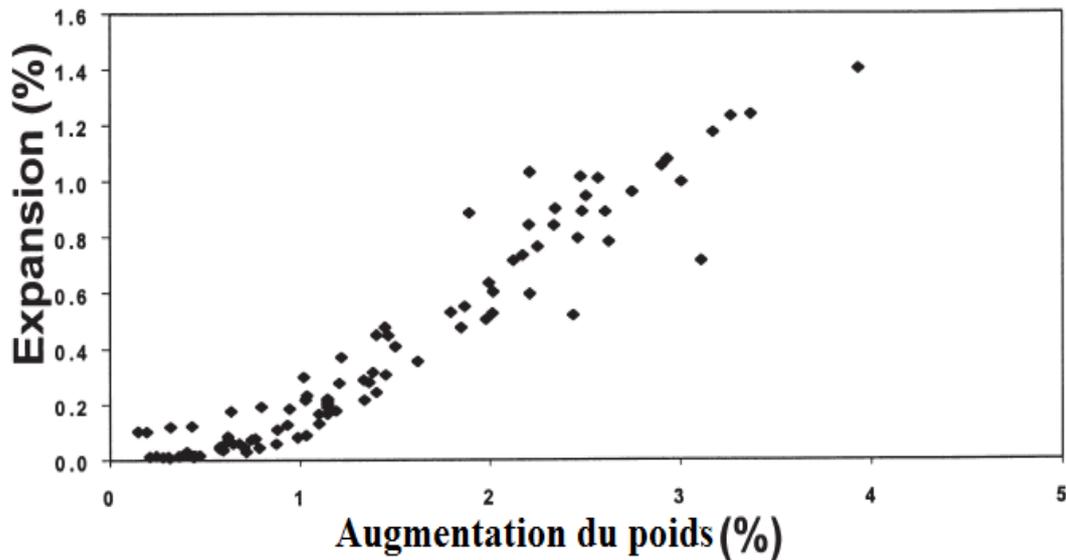


Fig I.11 : Corrélation entre l'expansion et l'augmentation du poids des mortiers contenant différents types de déchets de brique (B, D, L, P) exposé à des solutions de sulfates de sodium. [50].

I.13 Effet des déchets de brique sur la porosité

Gonçalves et al. [15] ont étudié l'effet de l'argile calcinée (déchets de brique et métakaolin) sur la porosité des mortiers. La brique a été fournie par une entreprise locale au Brésil ainsi que deux types de métakaolin à différents taux de substitution de ciment qui sont : 0%, 10%, 20%, 30% et 40%.

Il a été montré en premier lieu que les différents taux de substitution du ciment par les déchets de brique ne provoquent aucun changement de densité et de compacité des mortiers (Figure I.12).

Cela a été expliqué par la similarité des distributions des pores entre les mortiers à base de brique et les mortiers témoins.

La figure I.13 montre que les DB provoquent une augmentation de la porosité totale par rapport aux mortiers témoins. Le DB10 semble donner les meilleurs résultats et la différence par rapport aux mortiers témoins n'est pas importante.

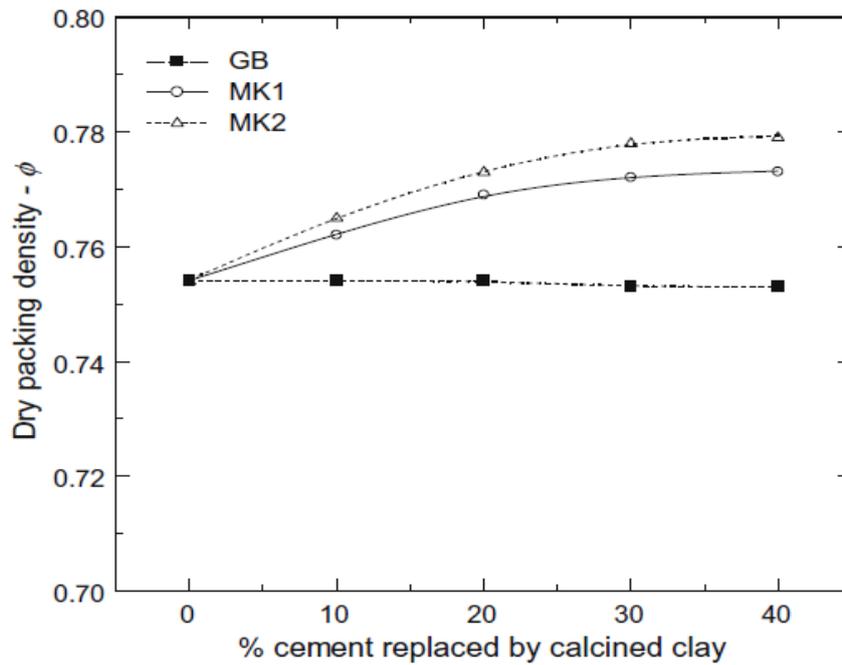


Fig I.12 : Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la densité et la compacité des mortiers [15].

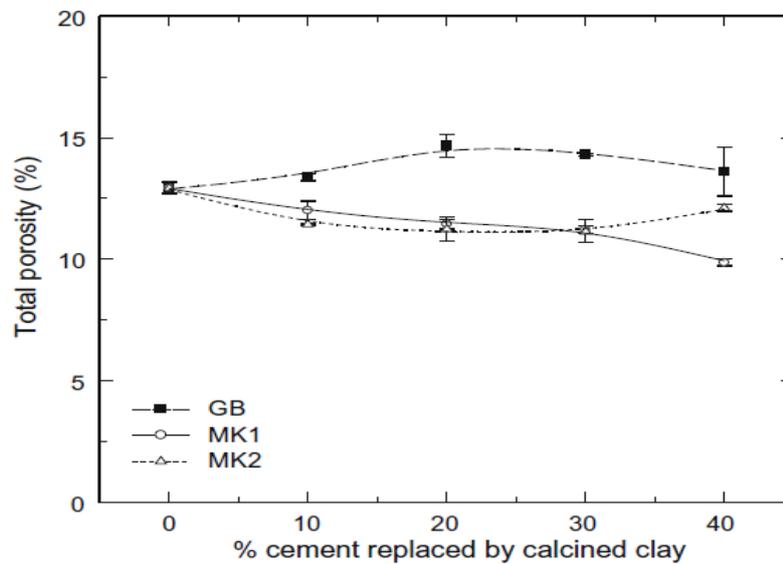


Fig I.13 : Effet des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la porosité totale [15].

La figure I.14 montre les différentes proportions entre les micropores et macropores provoquées par les différents taux de substitution. Il a été constaté que les déchets de brique provoquent une réduction des macropores et une augmentation des micropores ; ce qui explique la similitude du DB10 avec le mortier témoin dans la porosité totale engendrée.

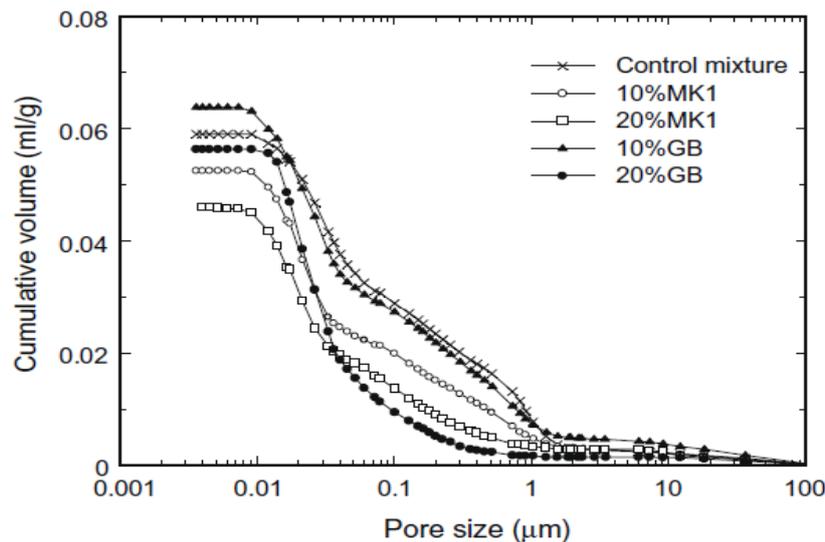


Fig I.14 : *Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB et MK sur la distribution des pores [15].*

L'augmentation de la porosité pour les taux de substitution de 20% et 30% de ciment par DB a été associée à une réduction du volume total des hydrates formés en comparaison avec les hydrates des mortiers témoins. Cependant, les hydrates présents dans les mélanges DB20 et la présence des particules de DB non hydraté ont conduit à une réduction des macropores [15].

I.14 Effet des déchets de brique sur l'absorption capillaire et la sorptivité

Gonçalves et al. [15] ont testé l'effet des déchets de brique sur l'absorption capillaire (Figure I.15). Il a été constaté que les déchets de brique ont un effet très positif sur la sorptivité, et plus le taux de substitution de ciment par les DB augmente plus la vitesse d'absorption diminue.

Cette réduction de la sorptivité avec l'augmentation du taux de substitution de ciment par les DB a été expliquée par un raffinement du système des pores causé par l'incorporation de la brique. L'incorporation de la brique dans la matrice cimentaire conduit à un raffinement du système des pores, par la réduction du taux des grands pores et l'augmentation de celui des

petits pores ce qui empêche donc la pénétration rapide de l'eau et réduit par conséquent la vitesse d'absorption capillaire.

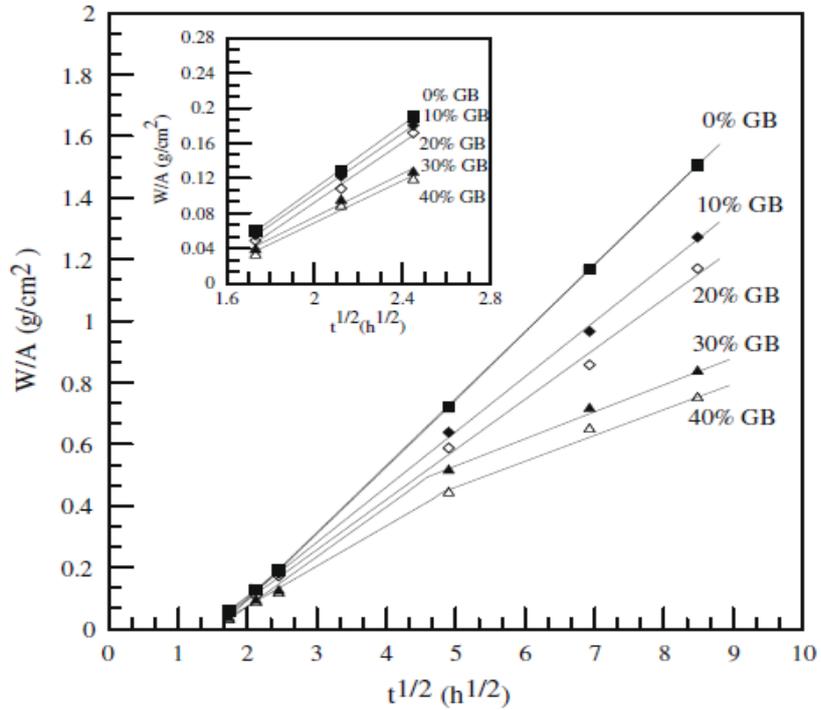


Fig I.15 : Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB sur la sorptivité [15].

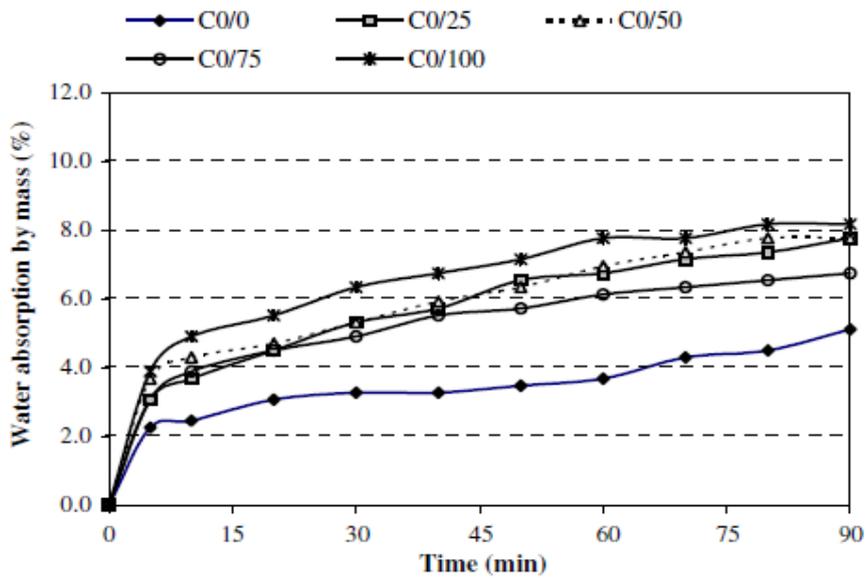


Fig I.16 : Effet des différents taux de substitution de sable par les briques [15].

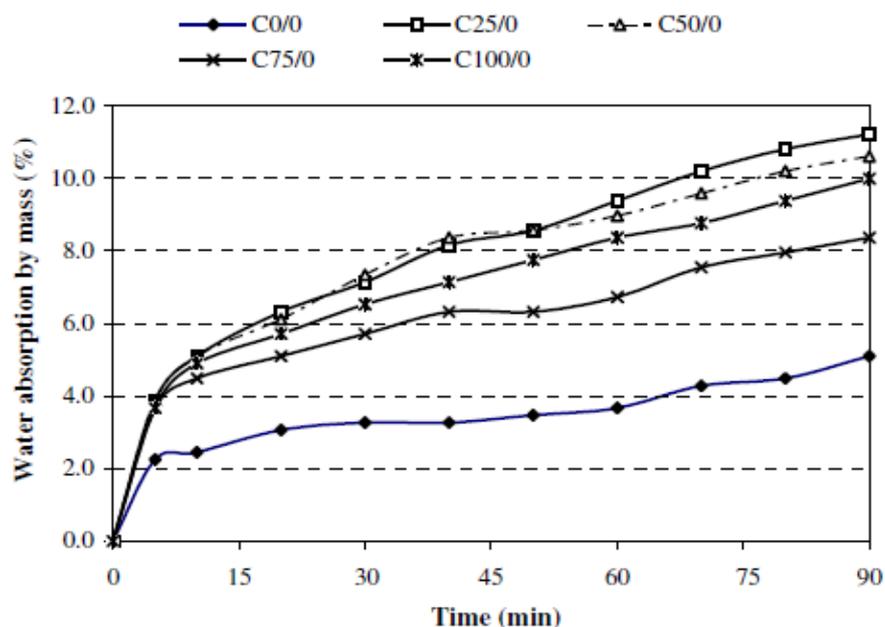


Fig I.17 : Effet des différents taux de substitution de gravier par les briques [37].

D'autres chercheurs [37, 40, 51] ont utilisé les déchets de brique dans la matrice granulaire et ont trouvé des résultats contraires concernant l'absorption capillaire par rapport à Gonçalves et al [15] (figures I.16 et I.17). Ceci montre l'effet négatif de substitution des granulats par la brique ou plus le taux de substitution augmente, plus l'absorption capillaire augmente. Cela a été expliqué par les pores qui existent dans les granulats. Nous pouvons conclure que l'utilisation de la brique broyée dans la matrice cimentaire est beaucoup plus bénéfique que son utilisation dans la matrice granulaire concernant l'absorption capillaire.

I.15 Effet des déchets de brique sur les diffusions des ions de chlore

L'incorporation des déchets de brique a provoqué la réduction de la pénétration des ions de chlore de 1.5 à 6 fois par rapport aux mortiers de référence [15]. Ceci a été expliqué par le raffinement du système des pores causé par l'incorporation des fines de brique.

I.16 Performance des mortiers et bétons à base de MK et DB

Le tableau I.2, présente l'effet de la substitution de ciment par du métakaolin ou des fines de brique sur quelques paramètres de performance et de durabilité des mortiers et bétons.

Tableau I.2 : Effet du MK et des DB sur la performance des mortiers et bétons

Paramètre des mortiers et bétons	Métakaolin	Fines de brique	Référence
Densité et compacité	Augmente	Pas de changement	[4, 8, 10, 15]
Temps de prise	Augmente	Augmente	[33, 58, 59]
Ouvrabilité	Diminue	Diminue	[8, 10, 14, 37, 53-55]
Résistance à la compression	Augmente	Diminue	[37-40 ; 56, 57]
Retrait total	Diminue	Diminue	[42, 52, 60]
Chaleur d'hydratation	Augmente	Diminue	[61, 62]
Porosité	Diminution des macropores et augmentation des micropores	Diminution des macropores et augmentation des micropores	[15, 63]
Absorption d'eau par capillarité	Diminue	Diminue	[15, 54, 63]
Perméabilité	Diminue	Diminue	[15, 54, 63]
Résistance à l'eau de mer	Augmente	Augmente	[16, 49, 64]
Résistance aux sulfates	Augmente	Dépend du type de brique	[50, 65]

I.17 Conclusion

L'incorporation des ajouts cimentaire dans la fabrication du ciment contribue à réduire la pollution des cimenteries à travers la réduction de la fabrication du clinker. Elle améliore les résistances mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires. L'Algérie dispose de grandes ressources en Kaolin qui peut être l'un des ajouts cimentaires à encourager.

L'utilisation des fines de brique comme une addition cimentaire à caractère pouzzolanique peut être aussi une solution avec de multiples intérêts. A savoir :

- ✓ le recyclage des déchets industriels,
- ✓ la préservation de l'environnement et des ressources naturelles,
- ✓ l'amélioration des performances des mortiers et bétons.

Les déchets de brique peuvent être issus des usines de fabrication de briques ou des déchets de maçonnerie et des chantiers de démolition.

Les déchets de brique en fines peuvent être recyclés comme additifs cimentaires pour l'amélioration des performances des mortiers et bétons en raison de leur réaction pouzzolanique. Le but principal de cette thèse est d'analyser l'effet de substitution de ciment par le métakaolin locale ou par les fines de déchets de brique sur le développement de l'hydratation, les résistances mécanique ainsi que la durabilité.

Référence bibliographiques

- [1] Khudhair M.H.R., Elyoubi M.S., Elharf A., "Formulation and characterization of a new ecological cementitious material at base of different percentage of limestone fillers: Study of physical -chemical and mechanical properties", *Materials and Environmental Science*, 2017 Vol. 8, N° 11, pp. 3973-3985.
- [2] Shahrabadi H., Nikoo H.S., Forsat M., "Effect of limestone on the mechanical properties of concrete containing silica fume and fly ash", *Materials and Environmental Science*, 2017, Vol. 8, N° 2, pp. 457-466.
- [3] Khudhair M.H.R., Elhilal B., Elyoubi M.S., Elharfi A., "Development of a new cementations material eco-friendly of the environment: Study of physical and mechanical properties", *Materials and Environmental Science*, 2017, Vol. 8, N° 7, pp. 2302-2310.
- [4] Sfikas I.P., Badogiannis E.G., Trezos K.G., "Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin", *Construction and Building Materials*, 2014, N° 64, pp. 121-129.

- [5] Basheer L., Basheer P.A.M., Long A.E., “Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete”, *Construction and Building Materials*, 2005, N°19, pp. 682-90.
- [6] Kumar R. and Bhattacharjee B., “Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2003, N° 33 pp. 155-164.
- [7] Rashad A.M., “Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer – An overview”, *Construction and Building Materials*, 2013, N° 41, pp. 751-765.
- [8] Said-Mansour M., Kadri E., Kenai S., Ghrici M., Bennaceur R., “Influence of calcined kaolin on mortar properties”, *Construction and Building Materials*, 2011, N° 25, pp. 2275-2282.
- [9] Bich C., “Contribution to the study of the thermal activation of kaolin: Evolution of the crystallographic structure and pozzolanic activity”. PhD Thesis. INSA of Lyon (France). 2005.
- [10] Si-Ahmed M., Kenai S., Ghorbel E., “Influence of metakaolin on the durability of mortars and concrete”, 31st University Meetings of the AUGC, ENS Cachan, France, 29-31 May 2013.
- [11] Navrátilová E. and Rovnaníková P., “Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars”, *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 120, pp. 530–539.
- [12] Gameiro A., Santos Silva A., Veiga R., Velosa A., “Hydration products of lime metakaolin pastes at ambient temperature with ageing”, *Thermochim. Acta*, Vol. 535, 2012, pp. 36–41.
- [13] Payá J., Monzó J., Borrachero M.V., Mellado A., Ordoñez L. M., “Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method”, *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, N°2, pp. 227-231.
- [14] Bektas F., Wang K., Ceylan H., “Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability”, *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp.1909-1914.
- [15] Gonçalves J.P., Tavares L.M., Toledo Filho R.D., Fairbairn E.M.R., “Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick” *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp. 1971-1979.
- [16] O'Farrell M., Wild S., Sabir B.B., “Resistance to chemical attack of ground brick±PC mortar. Part II. Synthetic seawater, Division of Built Environment, School of Technology, University of Glamorgan, Pontypridd, Mid Glamorgan CF37 1DL, UK”, *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, pp. 757-765.
- [17] Meziane O., Bensedira A., Guessoum M., Haddaoui N.J., “Preparation and Characterization of Intercalated Kaolinite with: Urea, Dimethyl formamide and an Alky lammonium Salt Using Guest Displacement Reaction”, *Materials and Environmental Science*, 2017, Vol. 8, N°10. pp. 3625-3635.
- [18] Santos F.N., Gomes de Sousa S.R., Bombard A.J.F., Vieira S. L., “Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments”, *Construction and Building Materials*, 2017, Vol. 143 pp. 92-103.
- [19] Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R., “Durability of mortar modified by metakaolin”, *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol. 33, pp. 1473-1479.
- [20] Ramezani pour A.M. and Hooton, R.D., “A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland limestone cement mixes containing SCMs,” *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 113, pp. 359-368.

- [21] Kenai S., Soboyejo W., Soboyejo A., "Some engineering properties of limestone concrete," *Materials and Manufacturing*, 2004, Vol. 19, N° 5, pp. 949-961.
- [22] Irassar E.F., "Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler", *Cement and Concrete Research*, 2009, Vol. 39, N° 3, pp. 241-254.
- [23] Bentz D., "Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D", *Cement and Concrete Composites*, 2006, Vol. 28, N° 2, pp. 124-129.
- [24] Said-Mansour M., "Influence du MK sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons à haute performance", Thèse de Doctorat, Université de Blida1, 2010.
- [25] Jones R.T., "Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete", *Structure and Performance of Concrete*, Eds. Bensted J., and Barnes P., 2nd Edition, 2002, pp. 372-397.
- [26] Cabrera J. and Rojas M.F., "Mechanism of hydration of metakaolin-lime-water system", *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 31, N° 4, pp.177-182.
- [27] Rojas M.F. and Cabrera J., "Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and water-blended cement systems at 20°C", *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, N°4, pp. 519-527.
- [28] Justice J.M. and Kurtis K.E., "Influence of Metakaolin Surface Area on Properties of Cement-Based Materials", *Materials in Civil Engineering*, 2007, Vol. 19, N° 9, pp. 762-771.
- [29] Poon C.S., Lam L., Ko S.C., Wong Y.L., Wong R., "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, N° 9, pp. 1301-1306.
- [30] Murat M. and Bachiorrini A., "Corrélation entre l'état d'amorphisme et l'hydraulicité du MK", *Bulletin Minéral*, 1982, Vol. 105, pp. 543-555.
- [31] Andriolo F.R. and Sgarabozza B.C., "Proceeding of the 7th International Conference of AAR", Grattan Bellow, 1985, pp. 66-70.
- [32] Lima Souza P.S. and Dal Molin D.C.C., "Viability of using calcined clays, from industrial by products, as pozzolans of high reactivity", *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, pp. 1993-1998.
- [33] Batis G., Pantazopoulou P., Tsvivilis S., and Badogiannis E., "The effects of MK on the corrosion behavior of cement mortars", *Cement and Concrete Composites*, 2005, Vol. 27, pp. 125-130.
- [34] Wu Z. and Young J.F., "The hydration of tricalcium silicate in the presence of colloidal silica", *Journal of Materials Sciences*, 1984, Vol. 19, pp. 3477-3486.
- [35] Dreux G. and Festa J., "Nouveau guide de béton et de ces constituants", Edition Eyrolles 1998.
- [36] ADEME., "Etude sur le prix d'élimination des déchets inertes du BTP, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie", Juin 2012.
- [37] Debieb F. and Kenai S., "The use of coarse and fine crushed brick as aggregate in concrete", *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, N° 5, pp.886-93.
- [38] Khalaf F.M. and DeVenny A.S., "Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete," *Materials in Civil Engineering*, 2004, Vol. 16, N° 4, pp. 33-40.
- [39] Desmyter J., Van Dessel J., Blockmans S., "The use of recycled concrete and masonry aggregates in concrete: Improving the quality and purity of aggregates", *Proceedings of the international conference. Dundee; 1999. pp. 139-49.*

- [40] Kibriya T. and Speare P.R.S., "The use of crushed brick coarse aggregate in concrete", Proceedings of the international conference, Dundee; 1996, pp. 495-503.
- [41] Akhtaruzzamana A. and Hasnat A., "Properties of concrete using crushed brick as aggregate," Concrete International, 1983, Vol. 2, pp. 58-63.
- [42] Hansen I.C., "Recycling of demolished concrete and masonry. RILEM Report of Technical Committee 37-DRC (demolition and recycling of concrete)", RILEM Report 6. London, UK: E&FN Spon; 1992.
- [43] Litvan G.G. and Sereda P.J., "Particulate admixture for enhanced freeze–thaw resistance of concrete", Cement and Concrete Research, 1977, Vol. 8, N° 1, pp. 53-60.
- [44] Neville A., "Propriété des bétons," Éditeur : Eyrolles; Collection Parution, septembre 2000.
- [45] Paillier A.M., Raverdy M., Serrano J.J., "Long term study of the influence of the mineralogical composition of cement on resistance to seawater: test in artificial seawater and in the channel, in the durability of concrete", ACI SP-145, Detroit, Michigan, 1994.
- [46] Conjeaud, M.L., "Mechanism of sea water attack on cement mortar, in performance of concrete in marin environment", ACI SP-65, 1980, pp 39-61.
- [47] Lea F.M., "The chemistry of cement and concrete, 3rd edn", Edward Arnold, London 1970.
- [48] Taylor H.F.W., "Cement chemistry, 2nd edn," Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- [49] Gollop R.S. and Taylor H.F.W., "Microstructural and micro-analytical studies of sulphate attack: IV. Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulphate solutions", Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, N° 7, pp. 1013-1028.
- [50] O'Farrell M., Wild S., Sabir B.B., "Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar Part I. Sodium sulphate solution", Cement and Concrete Research, 1999, Vol. 29, pp. 1781-1790.
- [51] Levy S.M. and Helene P., "Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development", Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, N° 11, pp. 1975-1980.
- [52] Khatib J.M., "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, N° 4, pp. 763-9.
- [53] Bai J., Wild S., Sabir B.B., Kinuthia J.M., "Workability of concrete incorporating pulverized fuel ash and metakaolin", Magazine of Concrete Research, 1999, Vol. 51, N° 3, pp. 207-216.
- [54] Khatib J.M. and Clay R.M., "Absorption characteristics of metakaolin concrete", Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, N° 1, pp. 19-29.
- [55] Qian X.Q. and Li Z.J., "The relationships between stress and strain for high performance concrete with metakaolin", Cement and Concrete Research, 2001, Vol. 31, N° 11, pp. 1607-1611.
- [56] Wild S., Khatib J.M., Jones A., "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete", Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, N° 10, pp. 1537-1544.
- [57] Sabir B.B., Wild S., Bai J., "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement and Concrete Composites", 2001, Vol. 23, N° 6, pp.441-454.

- [58] Brooks J.J., Johari M.A.M., Mazloom M., “Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete, Cement and Concrete Composites”, 2000 Vol. 22, N°1, pp. 293-301.
- [59] Vu D.D., Stroeven P., Bui V.B., “Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete”, Cement and Concrete Composites, 2001, Vol. 23, N° 6, PP. 471-478.
- [60] Khatib J.M., Sabir S., Wild S., “Some properties of MK paste and mortar” Concrete for environmental enhancement and Protection, Ed. Dhir R.K. and Dyer T.D. Spon Press, Londres, 1996.
- [61] Zhang M.H. and Malhotra V.M., “Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete”, Cement and Concrete Research, 1995, Vol. 25, N° 8, pp. 1713-1725.
- [62] Ambroise J., Maximilien S., Pera J., “Properties of metakaolin blended cements”, Advanced Cement Based Materials, 1994, Vol. 1, N° 4, pp. 161-168.
- [63] Khatib J.M. and Wild S., “Pore size distribution of metakaolin paste”, Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, N° 10, pp. 1545-1553.
- [64] Bai J., Wild S., Sabir B.B., “Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater”, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 353–362
- [65] Al-Akhras N.M., “Durability of metakaolin to sulfate attack”, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, N° 9, pp. 1727–1734.

Chapitre II
Matériaux
et
Protocole Expérimental

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble du contexte expérimental, qui a servi de support à cette thèse. Un aperçu sur les essais expérimentaux ainsi que la préparation des mélanges et les variables étudiées sont rapportés dans ce travail.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Les fines de déchet de brique

Les déchets de brique (DB) utilisés dans cette étude, proviennent d'une usine de la wilaya de Tipaza, située à environ 50 km à l'ouest d'Alger, qui utilise deux types d'argiles, argile jaune et argile grise (Figure II.1). Cette usine fabrique deux types de brique : la brique rouge à 8 trous de dimension 10x20x30 et la brique à 12 trous de dimension 15x20x30.

Une quantité importante de briques cassées, estimée à 6 050 m³ (équivalent à 7 865 tonnes) est entre posée aux alentours de l'usine (Figure II.2).

La figure II.3 monte la provenance des déchets de brique et du métakaolin utilisés dans cette étude.

Les fines de brique ont une masse volumique de 2500 kg/m³ et ont été broyées au laboratoire à une finesse SSB de 4190 cm²/g. La figure II.4 montre les fines de déchets de brique obtenues. La composition chimique des fines de déchets de brique est donnée dans le tableau II.1.



Argile jaune situé à Sidi Rached

Argile grise situé à Sidi Rached

Fig II.1 : Différents types d'argile utilisés pour la fabrication des briques.



Fig II.2 : Déchets de brique de fabrication déposés aux alentours de la briquetterie.

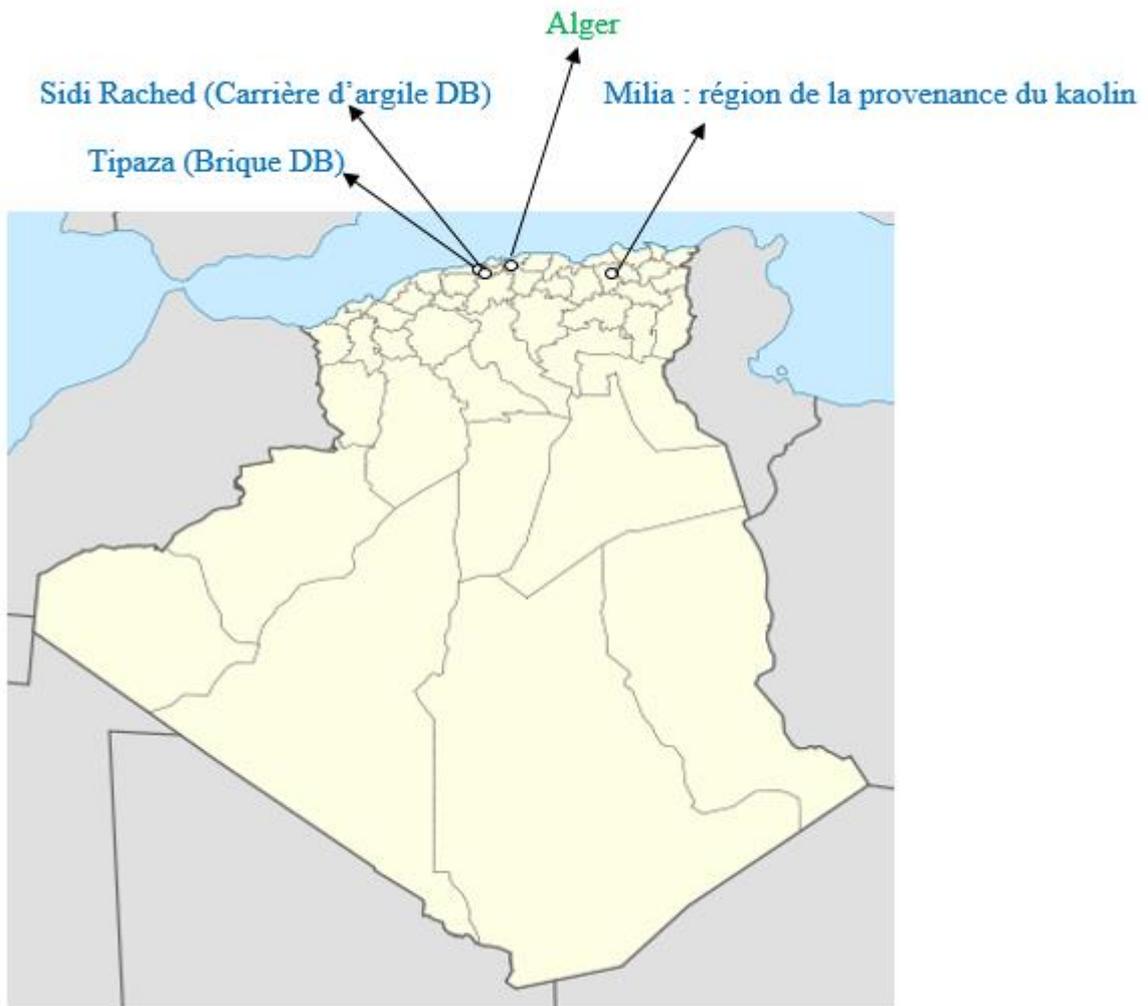


Fig II.3 : Localisation des sources de déchets de brique et du kaolin sur la carte d'Algérie.



Fig II.4: Fines de déchets de brique après broyage.

Tableau II.1 : Composition chimique des déchets de brique DB

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Brique	58.41	9.72	5.47	15.81	2.13	0.27	1.75	0.12	3.45

II.2.2 Le Kaolin

Le kaolin utilisé provient de la région d'El-Milia (Tamazert) qui se trouve dans la wilaya de Jijel, à 4 km de la ville d'El Milia. Cette argile correspond à la zone d'altération des gneiss, qui est souvent en contact avec les micaschistes. Deux types de faciès principaux différent par le degré d'altération de la roche mère à savoir le Kaolin sableux et le gneiss kaolinisé.

· Pour le Kaolin sableux

- Catégorie certaine : 2.588.000 t
- Catégorie probable : 5.554.000 t

· Pour les Gneiss Kaolinisés

- Catégorie certaine : 1.728.000 t
- Catégorie probable : 5.372.000 t

Ce kaolin présente une masse volumique tassée de 2650 kg/m³, une masse volumique absolue de 2600 kg/cm³ et une humidité d'environ 30% d'où la nécessité d'un séchage préalable. La composition chimique est donnée dans le [tableau II.2](#). Après broyage et calcination on obtient du métakaolin avec une finesse de 160 000 cm²/g. la figure II.5 montre le kaolin obtenu.

Tableau II.2 : Composition chimique du kaolin

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
0.08	50.08	34.03	1.62	0.41	0.24	0.09	2.79	2.53

**Fig II.5** : Kaolin.

II.2.3 Ciment

Trois types de ciment ont été utilisés dans cette étude. Les caractéristiques chimiques des ciments sont données dans le [tableau II.3](#), et les caractéristiques physiques et mécaniques sont données dans le [tableau II.4](#).

Tableau II.3 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques des ciments

Composition chimique (%)										
Ciment	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	Résidus
CEM I (C.RS.) 42.5	63.4	21.06	3.6	4.47	1.85	2.00	0.13	0.57	2.53	0.65
CEM II/A-L 42.5	59.3	17.1	4.8	2.82	1.85	2.61	0.48	0.67	10.14	3.10
CEM I 42.5 (FR)	63.4	20.10	4.5	2.4	1.9	3.2	0.11	0.76	2.4	0.63

Composition minéralogique du ciment (%)				
Ciment	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM I (C.RS.) 42.5	67.4	9.89	1.98	13.59
CEM II/A-L 42.5	56	18	5	13
CEM I 42.5 (FR)	68	10	8	8

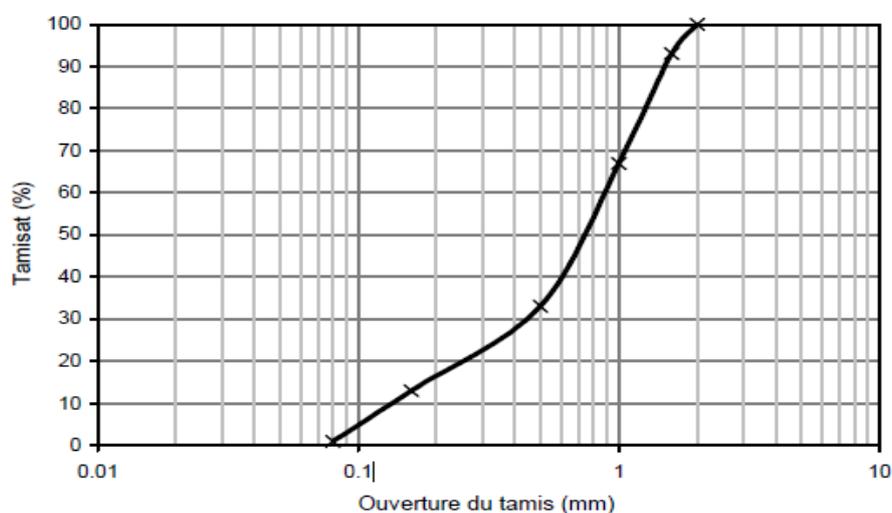
Tableau II.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques des ciments

Type de Ciment	Rc minimale à 28 (MPa)	ρ_{abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	SSB (cm ² /g)	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
CEMI (CRS) 42.5	44.10	3050	1200	3000	2h15	5h25
CEM II/A-L 42.5	43.23	3030	1083.68	4450	3h12	5h18
CEM I 42.5 (FR)	47.5	3160	1100	4250	3h00	3h30

Pour l'étude de la substitution de ciment par les fines de métakaolin, nous avons utilisé un ciment résistant aux sulfates de type CEM I 42.5. Pour ce qui est de l'étude de la substitution de ciment par les fines de déchets de brique, deux types de ciment ont été utilisés. Un ciment composé, de fabrication Algérienne, de type CEM II /A-L 42.5. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42.5 MPa. Le deuxième ciment est un CEM I 42.5 de fabrication Française (FR) pour les essais réalisés au laboratoire L2MGC de l'université de Cergy Pontoise France.

II.2.4 Sable pour mortier

Le sable utilisé dans notre étude est un sable normalisé conforme à la norme [NF EN 196-1 \[1\]](#). Il s'agit d'un sable naturel roulé de classe granulaire 0/2 et de masse volumique réelle égale à 2600 kg/m³. La courbe granulométrique de ce sable est représentée sur la [figure II.6](#).

**Fig II.6 :** Courbe granulométrique du sable normalisé.

II.2.5 Sable pour béton

Le sable utilisé pour la confection des éprouvettes en béton est un sable d'oued provenant de la région de Baghlia (**Figure II.7**). C'est un sable dont les grains sont caractérisés par une forme roulée de classe granulaire 0/5 mm. Les caractéristiques de ce sable sont données dans le **tableau II.5**. La courbe granulométrique est présentée sur la **figure II.8**.



Fig II.7 : Sable de Baghlia.

Tableau II.5 : Caractéristiques du sable de Baghlia

ρ_{abs} (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Humidité (%)	Module de finesse	Equivalent de sable
2560	1.10	1.67	3.32	82.6

II.2.6 Gravier

Le gravier utilisé est un gravier provenant de la région de Sétif, composé de deux classes granulaires (3/8 et 8/15) dont les principales caractéristiques sont illustrées dans le **tableau II.6**. Les courbes granulométriques sont données dans la **figure II.8**.

Tableau II.6 : Caractéristiques des granulats

Granulats	Classe granulaire (mm)	Densité absolue	Masse vol apparente (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Humidité (%)
Gravier	3/8	2.715	1465	0.50	0.13
	8/15	2.715	1475	0.50	0.30

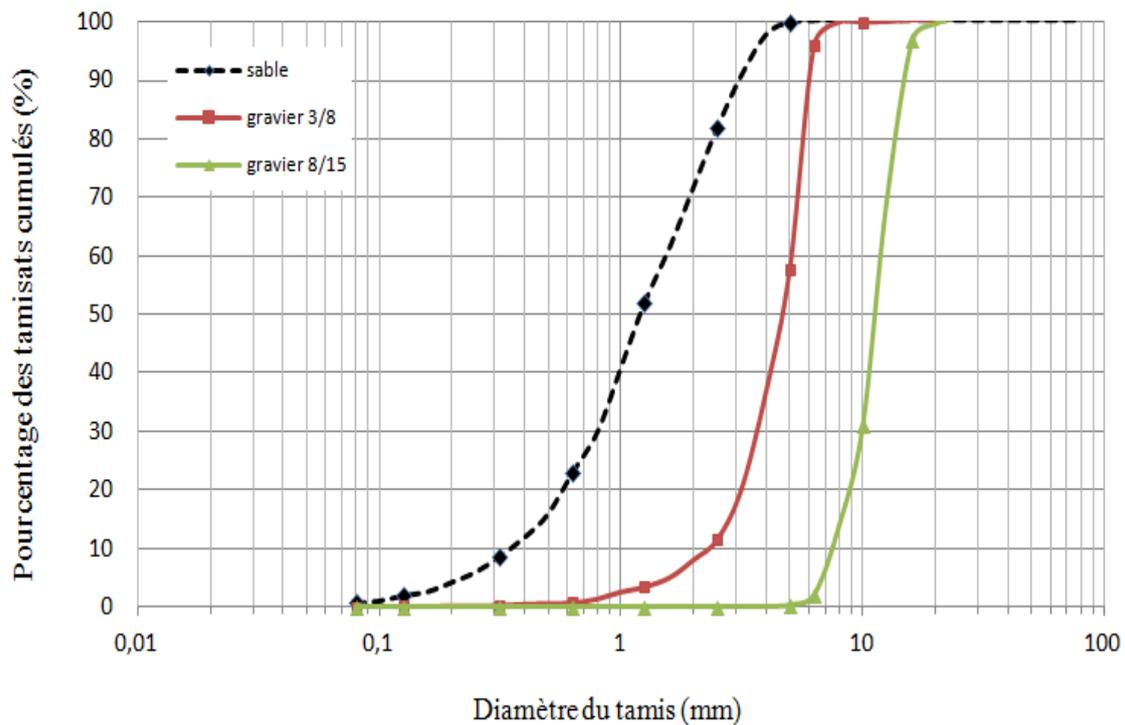


Fig II.8 : Distribution granulométrique des granulats.

II.2.7 Adjuvants

Pour avoir une ouvrabilité constante des mortiers, il a été utilisé un superplastifiant, haut réducteur d'eau, de troisième génération, coloré (brun clair), à base de polycarboxylate (PC), conforme à la norme [NF EN 934-2 \[2\]](#). Sa densité est de 1.07, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 0.1 g/l et il possède 30% d'extraits secs.

II.2.8 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet de notre laboratoire, exempte d'impuretés.

II.3 Protocole expérimental

II.3.1 Traitement thermique du kaolin

L'objectif de la calcination est de rendre pouzzolanique par déshydroxylation des matériaux considérés comme peu réactifs. Suite aux résultats trouvés par des travaux antérieurs [16] sur l'optimisation des conditions du traitement thermique du même kaolin, une température de calcination de 850°C pendant une durée de trois heures a été adoptée. Cette opération donne lieu à la formation de métakaolin.



Fig II.9 : *Calcination du kaolin.*

Le traitement thermique du kaolin est réalisé dans un four électrique à la température de 1100°C (Figure II.9). Il permet une montée en température linéaire de 10°C/min. L'échantillon est déposé dans un creuset. Le refroidissement s'effectue à la température ambiante. Les produits traités thermiquement sont conditionnés dans des sacs en plastique étanches.

II.3.2. Essai de consistance et de prise

L'essai de consistance est effectué selon la norme EN 196-3 [3]. L'appareil Vicat utilisé pour cet essai est composé d'un moule tronconique ($h=40$ mm $d_1= 70$ mm et $d_2= 80$ mm) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\Phi = 10$ mm.

La sonde est amenée à la surface de l'échantillon. Elle est ensuite relâchée sans élan (sans vitesse initiale). La sonde s'enfonce alors dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 sec d'attente), on relève la distance (d) séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base. La pâte sera à consistance normale si $d= 6$ mm ± 1 mm.

L'essai de prise est effectué selon la norme **EN 196-3 [3]**. C'est le même appareil qui est utilisé, dans les mêmes conditions à l'exception de la sonde où le diamètre est plus petit ($\Phi = 1.13$ mm). Une fois la pâte à consistance normale obtenue, l'aiguille de Vicat est relâchée à la surface de l'échantillon sans vitesse initiale. L'aiguille s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 sec d'attente), on relève la distance (d) séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base. L'opération est recommencée à des intervalles de temps convenables jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. La fin de prise est réalisée sur la phase inférieure de l'échantillon. La fin de prise est enregistrée lorsque l'aiguille de Vicat ne s'enfonce plus dans la pâte et ne laisse pas de trace.

II.3.3. Essai d'étalement des mortiers

Pour la confection des mortiers, nous avons utilisé un malaxeur de 5 litres de capacité. La séquence de malaxage conforme à la norme **NF EN 196-1 [1]**. Malaxer les matériaux (eau, ciment et addition) pendant environ 30 sec à vitesse lente, ajouter le sable et malaxer pendant 30 sec à vitesse lente aussi, passer ensuite à la vitesse rapide pendant 30 sec. Une pause est ensuite observée pendant une minute et 30 sec pour recalage. Effectuer en fin un malaxage pendant 60 sec à vitesse rapide.

L'essai d'étalement à la table à chocs est effectué conformément à la norme **NF EN 12350-5 [4]**. Cet essai consiste à utiliser une table à chocs comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical. Un moule tronconique est disposé sur cette table et rempli de mortier à étudier. Après arasement et démoulage (en soulevant le moule), on imprime à la table, à l'aide d'une manivelle, quinze chocs en quinze secondes (hauteur de chute = 12.5 mm). Le matériau s'étale sous forme d'une galette (**Figure II.10 et II.11**). Les deux diamètres perpendiculaires de l'étalement sont alors mesurés.



Fig II.10 : *Etalement de mortier.*

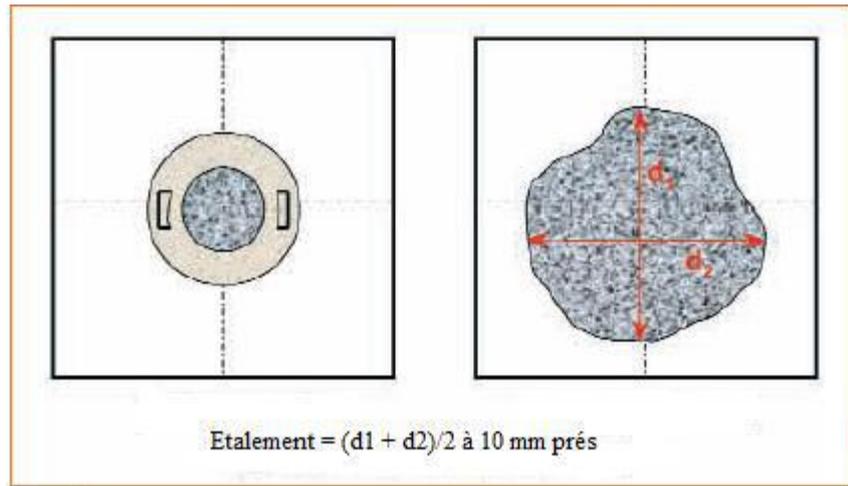


Fig II.11 : Principe de l'étalement à la table à choc.

L'étude bibliographique a montré que l'incorporation du métakaolin ou des déchets de brique engendrait une perte d'ouvrabilité dans les mortiers. Par conséquent et afin de maintenir une même ouvrabilité entre les différents mélanges avec un rapport E/C égale à 0,5, un superplastifiant haut réducteur d'eau est utilisé dans les mélanges et son dosage est déterminé par cet essai d'étalement.

II.3.4 Résistance des mortiers à la compression et à la flexion

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction par flexion et à la compression d'éprouvettes de mortier. La maniabilité étant constante, la seule variable est le pourcentage de métakaolin (MK) ou de fines de déchet de brique (DB). L'ensemble des équipements nécessaires est décrit de manière détaillée par la norme [NF EN 196-1 \[1\]](#).

Les moules normalisés permettent de réaliser trois éprouvettes prismatiques de section carrée $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Pour le compactage un appareil appelé table à chocs pour d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 sec.

Après moulage, les moules contenant les spécimens ont été couverts de film en plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et immergés dans l'eau à une température de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. La résistance à la compression et à la traction par flexion des mortiers a été évaluée sur trois éprouvettes.

II.3.5 Résistance aux sulfates et à l'eau de mer

Les sulfates peuvent se trouver dans plusieurs milieux (eau de mer, eaux souterraines,...), à des concentrations pouvant causer des désordres importants dans les structures en béton, notamment, dans les parties enterrées.

Pour étudier l'effet du taux de substitution de ciment par du métakaolin sur la résistance à l'attaque par les sulfates, une série d'éprouvettes de mortier à base de ciment au métakaolin (MK0, MK10, MK15, MK20, et MK30) ont été fabriquée et soumises à une cure humide de 60 jours. Les éprouvettes ont ensuite été immergées dans l'une des solutions suivantes :

- 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4).
- 5% de sulfate de magnésium (MgSO_4).
- eau de mer.

Pour des raisons de comparaison, des éprouvettes témoins ont été conservées dans l'eau. Il faut également mentionner que les solutions de sulfates et d'eau de mer ont été renouvelées chaque mois.

L'expansion a été mesurée sur des éprouvettes ($25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$) selon la norme [ASTM C 267 \[5\]](#) en utilisant un comparateur de précision de $1 \text{ } \mu\text{m}$. Les mesures sont effectuées à l'aide de plots, fixés sur les faces latérales de l'éprouvette à une distance de 200 mm ([Figure II.12](#)). Les mesures ont été prises tous les 15 jours, durant toute la période d'immersion.



Fig II.12 : *Mesure de l'expansion des éprouvettes $25 \times 25 \times 28 \text{ mm}^3$.*

II.3.6 Formulation et préparation des éprouvettes de bétons

La composition des bétons a été calculée sur la base de **la méthode de Dreux [6]**. La résistance caractéristique à la compression visée à 28 jours est de 30 MPa, avec une consistance plastique de 70 à 90 mm. Pour tous les mélanges de bétons réalisés, le dosage en liant (ciment + métakaolin) est de 420 kg/m³. Les liants utilisés sont obtenus par substitution partielle massive du ciment par différents pourcentages de métakaolin (0%, 10%, et 15%) avec une même ouvrabilité plastique. Pour tous les liants utilisés, le rapport (E/L) est de 0.52. Le dosage des granulats adopté est comme suit :

G 8/15 = 51%; G 3/8 = 15%; S 0/3 = 34%. Afin de compenser la perte d'ouvrabilité engendrée par le métakaolin, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération polycarboxylate (PC), conforme à la norme **NF EN 934-2 [2]**.

Les constituants du béton sont introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie et sont mélangés à sec pendant 30 sec. L'eau est ensuite introduite pendant une minute et le malaxage poursuivi durant 3 min. La mise en place du béton est réalisée conformément aux normes **NF P 18-404 [7]** et **NF P 18-405 [8]**.

Après coulage, les éprouvettes sont couvertes par un film plastique pendant 24 heures. Après le démoulage, elles sont conservées dans l'eau saturée de chaux à une température de 20 ± 2°C jusqu'à échéance d'essai.

II.3.7 Essai d'ouvrabilité des bétons

L'ouvrabilité des mélanges, est déterminée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (slump-test) conformément à la norme **NF P 18-451 [9]**. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre (**Figure II.13**). Plus l'affaissement sera grand, plus le béton sera considéré fluide. L'ouvrabilité souhaité est plastique et par conséquent l'affaissement recherché : A = 6 à 9 cm.



Fig II.13 : Essai de consistance au cône d'Abrams.

II.3.8 Résistance à la compression des bétons

La résistance à la compression des bétons étudiés est déterminée sur des cubes de 100 mm après 7, 28 et 60 jours de cure humide (Figure II.14). L'essai est réalisé conformément à la norme **NF EN 12390-3** [10]. Une presse de compression de capacité 3000 kN avec une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s.



Fig II.14 : Essai de compression pour béton.

II.3.9. Absorption d'eau par capillarité des bétons

Le transfert d'eau dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface liquide/solide/gaz dans les pores capillaires, est appelé absorption d'eau par capillarité. L'absorption capillaire dépend de la structure poreuse (porosité ouverte, taille et interconnexion des pores) et de l'état hydrique du matériau.

Dans cet essai, des blocs de béton (MK0, MK10 et MK15) de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ sont préparés. Après leur conditionnement en chambre humide ($HR = 95\%$ et $T = 20^\circ\text{C}$) pendant la période de maturation étudiée (60 jours), les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée pendant 48 heures, jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0.1\%$ en 24 heures). Une hauteur d'environ 2 cm de la surface latérale des éprouvettes a été enduite par de la résine, pour permettre une pénétration d'eau unidirectionnelle (Figure II.15).

L'essai est réalisé selon la norme **ASTM C1585 – 13** [11]. L'échantillon est placé sur deux appuis collés sur le fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de $2 \pm 1 \text{ mm}$ à partir de la base de l'éprouvette. Ce niveau d'eau est maintenu constant pendant la durée de l'essai. La variation de la masse est mesurée après 1min, 5min, 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h,

5 h, 6 h, 1 jour, 2 jours, 3 jours, 4 jours, 5 jours, 6 jours, 7 jours, 8 jours. La pesée des éprouvettes est effectuée après les avoir essuyées à l'aide d'une peau de chamois humide pour enlever les gouttes d'eau de la surface.

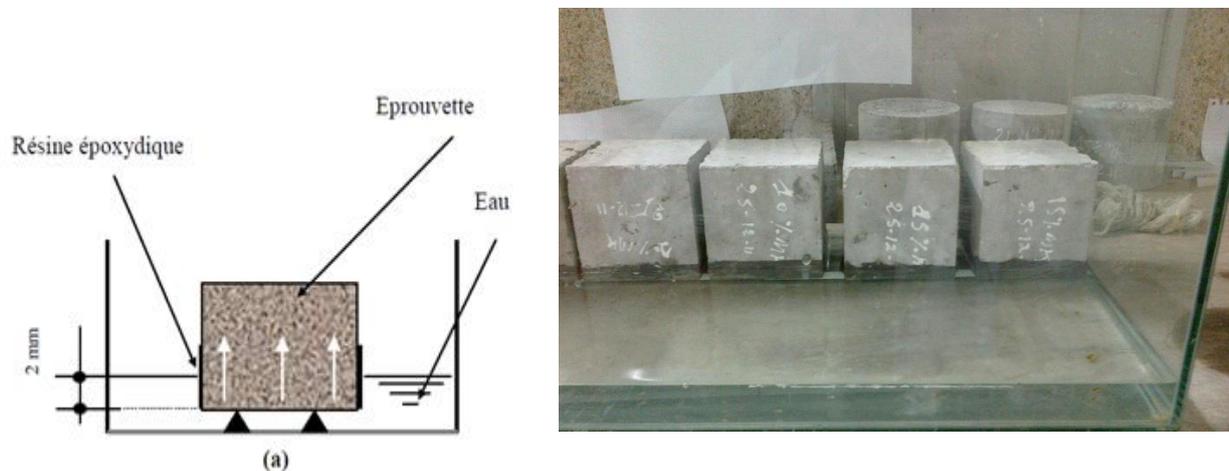


Fig II.15 : Schéma (a) et vue d'ensemble (b) du dispositif d'essai de l'absorption d'eau par capillarité.

L'absorption d'eau par unité de surface Ca_t , après un temps t d'immersion est déterminée par l'équation 1:

$$Ca_t = \frac{Mt - M_0}{A} \dots\dots\dots(1)$$

L'absorption d'eau Ca_t est proportionnelle à la racine carrée du temps (Equation 2). De ce fait, un coefficient d'absorption S est déterminé par régression linéaire de l'ensemble des mesures se trouvant dans le domaine d'évolution linéaire de l'absorption Ca_t , le plus souvent entre 1 et 8 heures. Ce coefficient indique la tendance de l'éprouvette à s'imprégner d'eau par action capillaire, sans aucune pression extérieure.

$$Ca_t = S\sqrt{t} \dots\dots\dots(2)$$

II.3.10 Perméabilité au gaz

L'essai de perméabilité au gaz est réalisé sur des disques de 50 mm d'épaisseur et 150 mm de diamètre, obtenus par sciage des éprouvettes cylindriques de béton de 150 mm de hauteur.

Après la période de cure humide de (60 jours), les éprouvettes sont séchées à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0.1\%$ en 24 heures) (Figure II.16).

La méthode utilisée, dite de **Cembureau** [12], consiste à soumettre l'échantillon à un gradient de pression constant et à mesurer, lorsque le régime permanent est atteint, le débit d'écoulement du gaz à travers cet échantillon (Figure II.17). Le schéma de principe du perméamètre est donné par la figure II.18. Cet appareil permet de mesurer des perméabilités de l'ordre de 10^{-19} à 10^{-14} m².



Fig II.16 : Sciage des éprouvettes cylindriques de béton.

La relation de Hagen-Poiseuille pour les écoulements laminaires d'un fluide compressible dans des milieux poreux est employée pour la détermination du coefficient de perméabilité au gaz K pour une pression donnée (Equation 3) :

$$K = \frac{2.P_a.Q.L.\mu}{A.(P_0^2 - P_a^2)} \dots \dots \dots (3)$$

Q = le débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (m³/s).

P_a = la pression atmosphérique (Pa),

L = l'épaisseur d'échantillon (m),

A = la section d'échantillon (m²),

P_0 = la pression absolue appliquée à l'amont (Pa),

μ = la viscosité de l'azote (1.7510^{-5} Pa.s, à 20°C).

Trois pressions d'entrée P_0 (1.5, 2.0, 2.5 et 3 bar) sont utilisées pour chaque éprouvette. Le coefficient de perméabilité (apparent) est obtenu par la moyenne des valeurs résultant pour chaque pression, et pour deux éprouvettes.



Fig II.17 : Appareillage de mesure de la perméabilité au gaz.

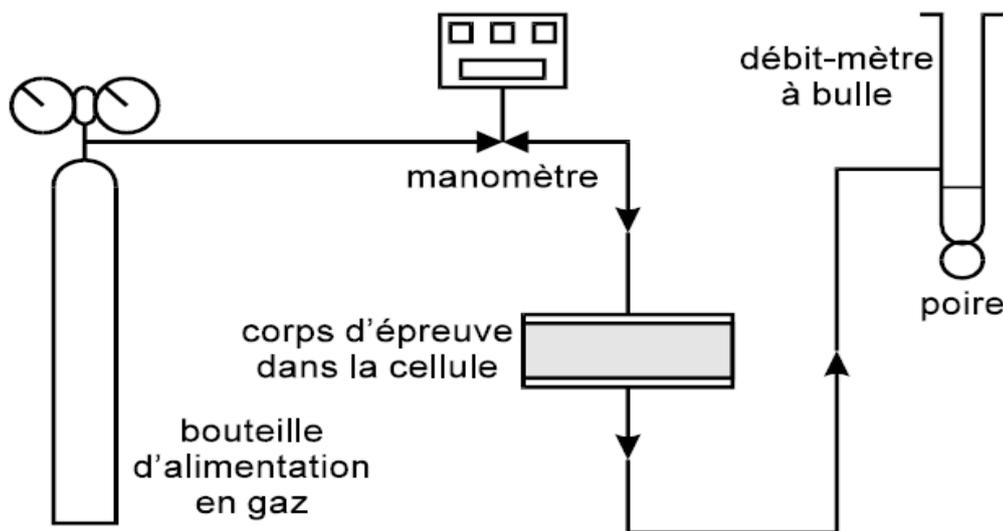


Fig II.18 : Schéma du perméamètre de type Cembureau.

II.3.11 Essai de pénétration d'eau sous pression

L'essai de pénétration d'eau sous pression (perméabilité à l'eau) est effectué selon la norme **DIN 1048 [13]**, sur les bétons étudiés, après un mûrissement dans l'eau à 20°C pendant 60 jours. Avant l'essai, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

L'essai consiste à appliquer de l'eau sous pression sur la face inférieure de l'éprouvette, pendant un temps donné et de mesurer la profondeur de pénétration de l'eau (**Figure II.19**). Dans notre cas, une pression de 3 bars est appliquée pendant 24 heures. À la fin de l'essai, l'éprouvette est fendue en deux parties par un essai de traction par fendage et la profondeur de la pénétration de l'eau est mesurée (**Figure II.20**). Pour chaque variable, deux éprouvettes sont testées et la valeur moyenne est calculée.

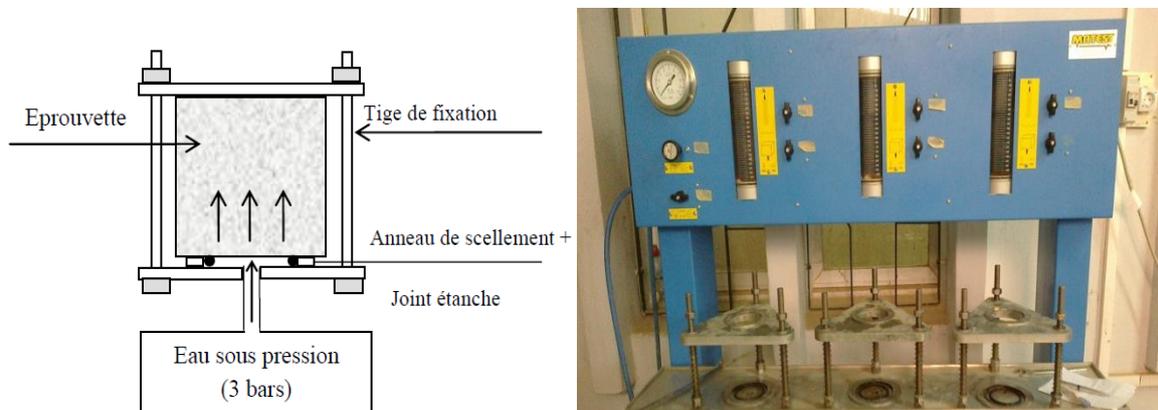


Fig II.19 : Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression.



Fig II.20 : Essai de traction par fendage (essai Brésilien).

II.3.12 Calorimétrie semi adiabatique

Le dégagement de chaleur est issu de l'hydratation du ciment, dont la cinétique et l'intensité dépendent directement de la composition chimique et des réactions d'hydratation.

Dans le cas des liants avec ajout cet essai va nous permettre de voir si les réactions d'hydratation sont indépendantes ou liées. L'intensité de la chaleur d'hydratation ainsi que les retards ou les accélérations enregistrées dépendent aussi directement des réactions chimiques qui se produisent lors de l'hydratation. La mesure de la variation de la température par continuité dans les mortiers normalisés par le calorimètre semi-adiabatique (dite méthode du calorimètre de Langavant) nous permet d'évaluer la chaleur d'hydratation obtenue par le calcul de la somme de la chaleur dans le vase Dewar et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant par la formule (4) conformément à la norme EN 196-9 [14].



Fig II.21 : Calorimètre adiabatique à l'intérieur de la chambre climatique.

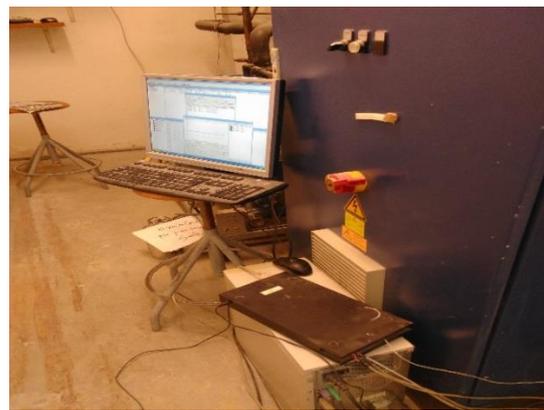


Fig II.22 : Centrale d'acquisition.

$$Q \text{ (J/g)} = \frac{C}{mc} \Theta_t + \frac{1}{mc} \int_0^t \alpha \cdot \Theta_t \cdot dt \dots \dots \dots (4)$$

- Q : Chaleur d'hydratation (J/g)
- C : Capacité thermique total du calorimètre (J/°C)
- mc : Masse du ciment (g)
- t : Le temps d'hydratation (h)
- Θ_t : La température de l'échantillon à l'instant t (°C)
- α : Coefficient de perte de chaleur du calorimètre (J/h/°C)

II.3.13 Analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique

Cet essai est effectué sur les déchets de brique ainsi que les poudres de mortiers. Cet essai permet de voir le comportement des poudres en fonction de la température. Cela nous permet de déterminer la perte de masse et la chaleur absorbée ou dégagée en fonction de la température.

Les échantillons de mortiers utilisés pour les essais ATG/ATD sont broyés au vibrobroyeur. Le matériel est constitué d'un bol et d'une garniture en tungstène. Les échantillons sont introduits dans le bol avec la garniture. L'ensemble est solidement fixé sur une table vibrante à l'aide d'un levier (Figure II.23). Un mouvement vibratoire circulaire et horizontal entraîne la plaque. La force centrifuge de la garniture réduit les échantillons en poudre. La poudre ainsi obtenue est constituée de grains dont les dimensions sont inférieures à 30 μm .



Fig II.23 : Vibrobroyeur à disque et sa garniture.

Les produits d'hydratation du ciment, lorsqu'ils sont soumis à de hautes températures, se décomposent et libèrent de l'eau et/ou du dioxyde de carbone. La mesure de ces différentes pertes d'eau à travers l'analyse thermogravimétrique permet d'évaluer la teneur en portlandite et la part d'eau liée ayant réagi avec le liant du matériau.

L'évolution de la perte de masse entre 100°C et 500°C correspondant à la quantité d'eau liée du ciment hydraté nous donne une indication sur le taux d'hydratation. Il est donc possible

d'évaluer le degré d'hydratation du liant à travers l'analyse thermogravimétrique, en prenant pour hypothèse que le degré d'hydratation est proportionnel à la quantité d'eau liée.

La représentation de l'évolution du flux thermique, lors d'une analyse thermique différentielle, menée en parallèle de l'analyse thermogravimétrique, permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés. Chaque phase hydratée est représentée par un pic endothermique ou exothermique.

L'analyse calorimétrique différentielle couplée à l'analyse thermique gravimétrique (DSC/ATG) et l'analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermique gravimétrique (ATD/ATG) ont été enregistrés à l'aide de la machine Netzsch STA 449F1 de l'université de Cergy Pontoise (Figure II.24). Le mode opératoire adopté pour ces essais, est une vitesse de chauffe de 10°C/minute sur les différents mortiers réduit au préalable en poudre en utilisant le vibrobroyeur. Les poudres sont introduites dans les creusets de l'appareil sous atmosphère contrôlée. La température varie de 20°C à 1000°C. Les flux de chaleurs accompagnés de variations en poids sont associés aux transitions de phase dans les différents ciments en fonction de la température et du temps.



Fig II.24 : Machine utilisé pour l'essai ATD/ATG.

II.3.14 Essais au microscope électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

S'appuyant sur les travaux de Max Knoll et Manfred Von Ardenne dans les années 1930, la MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

Un certain nombre de facteurs influencent la morphologie des hydrates de la pâte cimentaire. Il est cité notamment le rapport eau sur ciment, le PH de la solution interstitielle, la nature des produits de base en présence et leur quantité. Les hydrates formés peuvent aussi changer au cours du temps (conversion des hydrates). Celle-ci peut avoir un effet positif s'il s'agit d'une densification de la matrice ou négatif si elle s'accompagne d'une augmentation importante en volume (formation d'ettringite supplémentaire). Les quantités d'hydrates n'augmentent pas forcément lors de ces modifications. Une observation de la microstructure au moyen de la microscopie électronique à balayage est alors utile pour obtenir ces informations. Cette technique apporte des informations sur les faciès cristallins des matières premières et des hydrates formés au cours du durcissement.

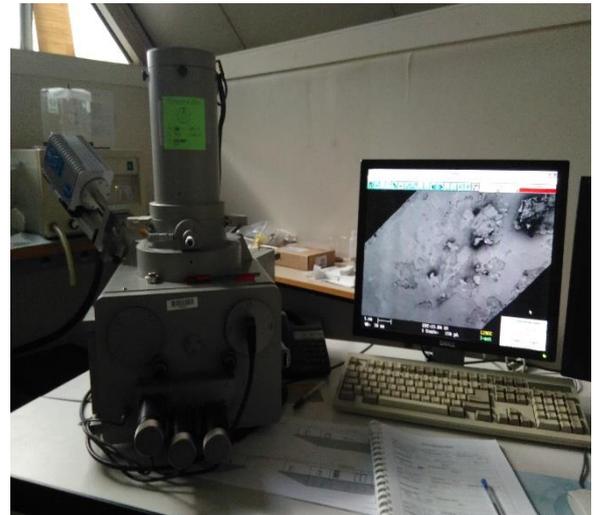


Fig II.25 : *Microscope électronique à balayage.*

II.3.15 Essai de retrait total

La mesure du retrait a été effectuée selon la norme [NF P15-433\[15\]](#) sur des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$. La mesure du retrait a été réalisée par un comparateur numérique de précision de $1 \mu\text{m}$ ([Figure II.26](#)). L'objectif de cet essai est de mesurer la variation de la longueur des éprouvettes tout au long de leur hydratation à l'aide de plots placés aux extrémités des

éprouvettes. Il est à noter que le début des mesures s'effectue après 24 heures d'hydratation, car les éprouvettes doivent être démoulées avant de pouvoir commencer les essais.

Cet essai a été réalisé dans une salle climatique normalisée d'humidité relative de 50% et de température de 20°C.



Fig II.26 : *Dispositif pour l'essai de retrait.*

II.4 Organigrammes des essais expérimentaux

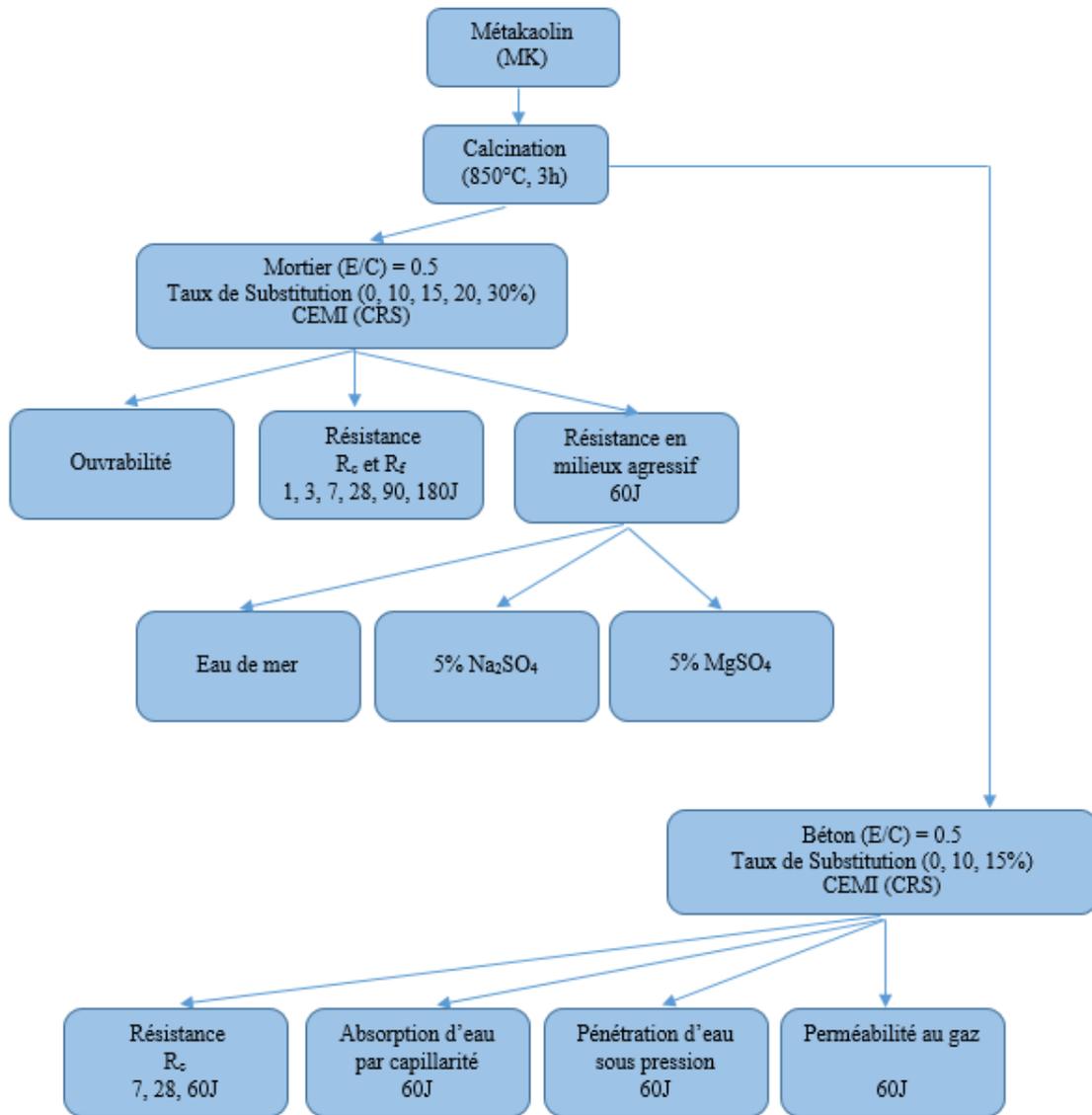


Fig II.27 : Programme expérimental de l'étude sur le métakaolin.

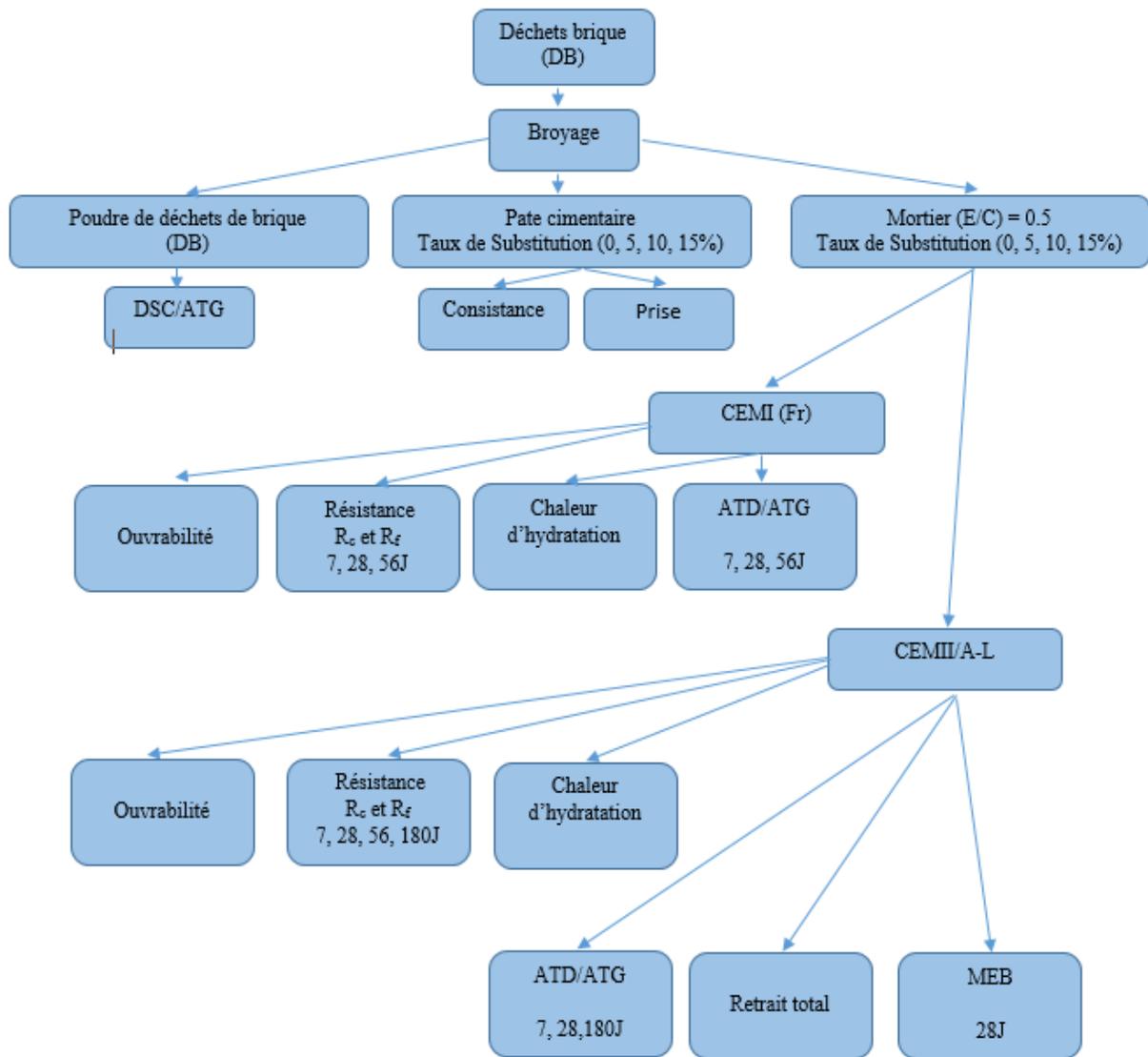


Fig II.28 : Programme expérimental de l'étude sur les fines de DB.

Références bibliographique

- [1] NF EN 196-1 Septembre 2016, “Partie 1 : détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances ”.
- [2] NF EN 934-2 Août 2012, “Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage”.
- [3] NF EN 196-3 Septembre 2017, “Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité”.
- [4] NF EN 12350-5 Juin 2009, “Essais pour béton frais - Partie 5 : essai d'étalement à la table à choc”.
- [5] ASTM C267 – Janvier 2012, “Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes”.
- [6] G. Dreux, Jean Festa Juin 1998, “Nouveau guide du béton et de ses constituants”, Edition Eyrolles,
- [7] NF P18-404 Décembre 1981, “Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes”.
- [8] NF P18-405 Décembre 1981, “Bétons - Essai d'information - Confection et conservation des éprouvettes”.
- [9] NF P 18-451 Bétons Décembre 1981 “Essai d'affaissement”.
- [10] NF EN 12390-3 Avril 2012, “Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes”.
- [11] ASTM C1585 - 13–2013, “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes”.
- [12] Kollek JJ., “The determination of the permeability of concrete to oxygen by Cembereau method: a recommendation”, Materials and structures, vol. 22, 1989, pp 225-230.
- [13] DIN 1048: German Standard for determination of Permeability of Concrete
- [14] EN 196-9, “Standard: Methods of Testing Cement. Part 9. Heat of Hydration –Semi Adiabatic Method”, 2010.
- [15] NF P15-433 Février 1994, “Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement”.
- [16] Said Mansour M. “Influence of MK on the rheological and mechanical behavior of high performance concretes”, PhD Thesis, University of Blida1 (Algeria) and University of Cergy Pontoise (France), 2010.

Chapitre III
Résultats et Analyse,
Métakaolin

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, sont reportés les résultats des essais sur l'effet de substitution de différents taux de ciment par du métakaolin, sur le comportement des mortiers et béton à l'état frais et durci.

III.2 Influence du MK sur la maniabilité du mortier

La figure III.1 montre l'influence du MK sur la demande en superplastifiant pour un étalement constant des mortiers et pour différents taux de substitution de ciment par le MK. Nous remarquons que la demande en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en MK, en raison de la grande finesse du MK comparé au ciment. La finesse du MK est de l'ordre de $160\ 000\ \text{cm}^2/\text{g}$ en comparaison à $3000\ \text{cm}^2/\text{g}$ pour le ciment utilisé. La même tendance a été trouvée par d'autres chercheurs [1-3].

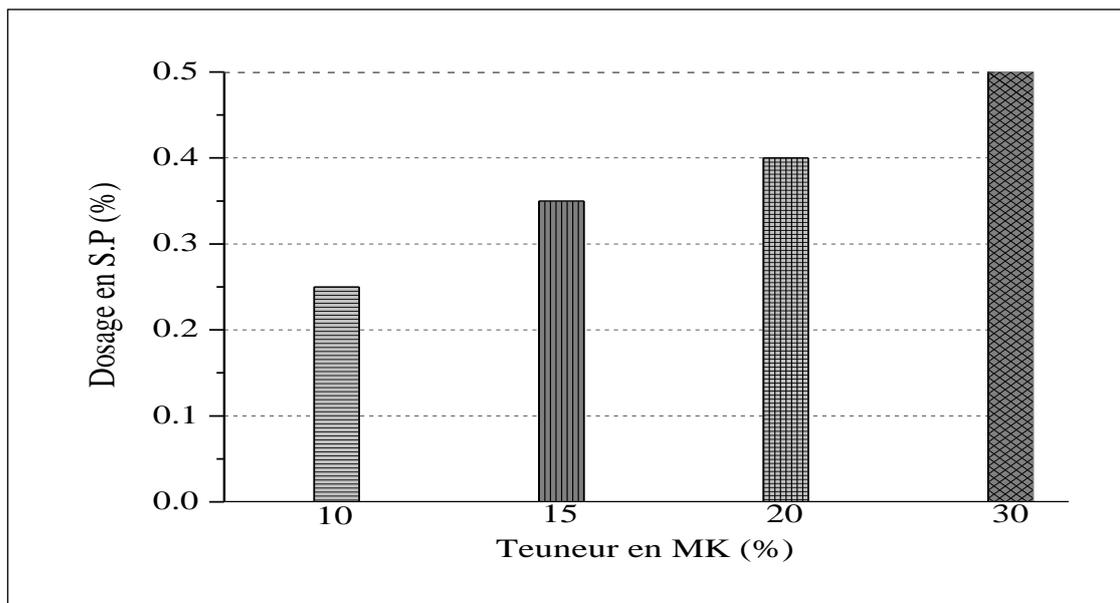


Fig III.1 : Influence de la teneur en MK sur la demande en superplastifiant pour les mortiers.

III.3 Influence du MK sur la résistance à la compression des mortiers

La figure III.2 montre que le métakaolin joue un rôle important dans l'accroissement de la résistance à la compression des mortiers à partir du 7^{ème} jour d'âge mais reste inférieur par rapport aux résultats obtenus pour les mortiers de référence.

La substitution de 10%, 15%, 20% et 30% de ciment par du MK produit des liants avec la même classe de résistance que le ciment sans substitution.

La substitution de 10% et 15% de ciment par le MK semble produire les meilleures résistances de compression à long terme. Par contre le MK15 semble produire les meilleurs résultats à 28 jours d'âge.

L'effet positif du MK sur la résistance à la compression est clairement observé à partir du 7^{ème} jour d'âge. La baisse de résistance dans les mortiers contenant du MK est due à la faible pouzzolanicité de ce dernier. L'indice d'activité de résistance (ISC) selon la norme ASTM C 618 [4] est de 91% contre 150% pour le MK utilisé par d'autres chercheurs [2, 5, 7- 9].

Afin de mieux comprendre l'effet de substitution du ciment par du métakaolin sur la résistance à la compression, nous rapportons dans la [figure III.3](#) la résistance à la compression relative (R_c mortiers avec MK / R_c mortiers sans MK).

Après trois jours de cure humide la résistance relative des mortiers à base de MK est de 60 à 80%, tandis qu'après 7 jours d'hydratation la résistance relative est d'environ 90%. A long terme cette résistance relative se stabilise au tour de 80% à 91%.

Cette baisse de résistance comparée aux mortiers témoins est attribuée principalement à la faible propriété pouzzolanique du MK utilisé.

Les principaux facteurs qui influencent la contribution du MK sur le développement de la résistance sont (a) l'effet de remplissage (effet filler), (b) l'effet de dilution, et (c) et l'effet pouzzolanique issu de la réaction du MK avec l'hydroxyde de calcium CH [10,11].

La réduction de la résistance à long terme du mortier MK20 en comparaison aux autres mélanges dans les figures III.2 et III.3 est dû à un effet de dilution du clinker. L'effet de dilution est une conséquence de la substitution, d'une partie de ciment par une même quantité de métakaolin.

Pour cette raison, il y a un optimum de taux de remplacement du ciment par le métakaolin. Dans notre cas le MK15 semble donner les meilleures résistances à 28 jours tandis que les MK10 et MK30 produisent les meilleures résistances à long terme. Le développement de la résistance à la compression par l'ajout du MK a été rapporté aussi par d'autres chercheurs [5-7, 12-14] où l'optimum du taux de substitution est de l'ordre de 10% à 15%.

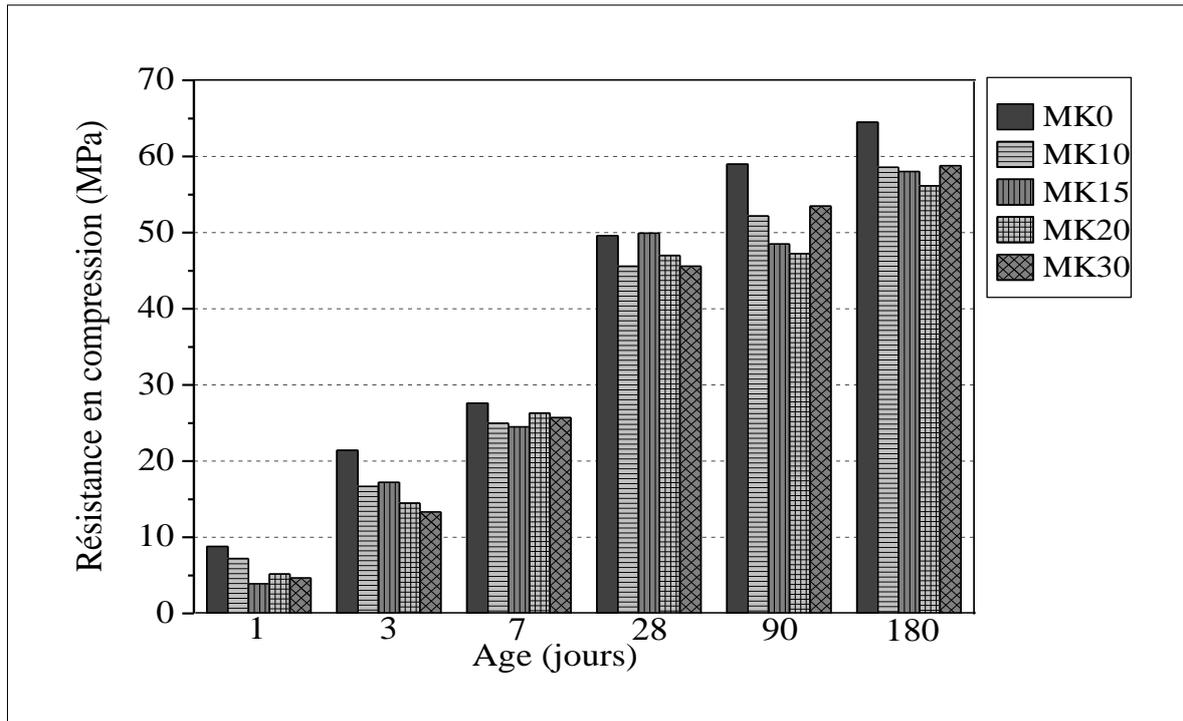


Fig III.2 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge.

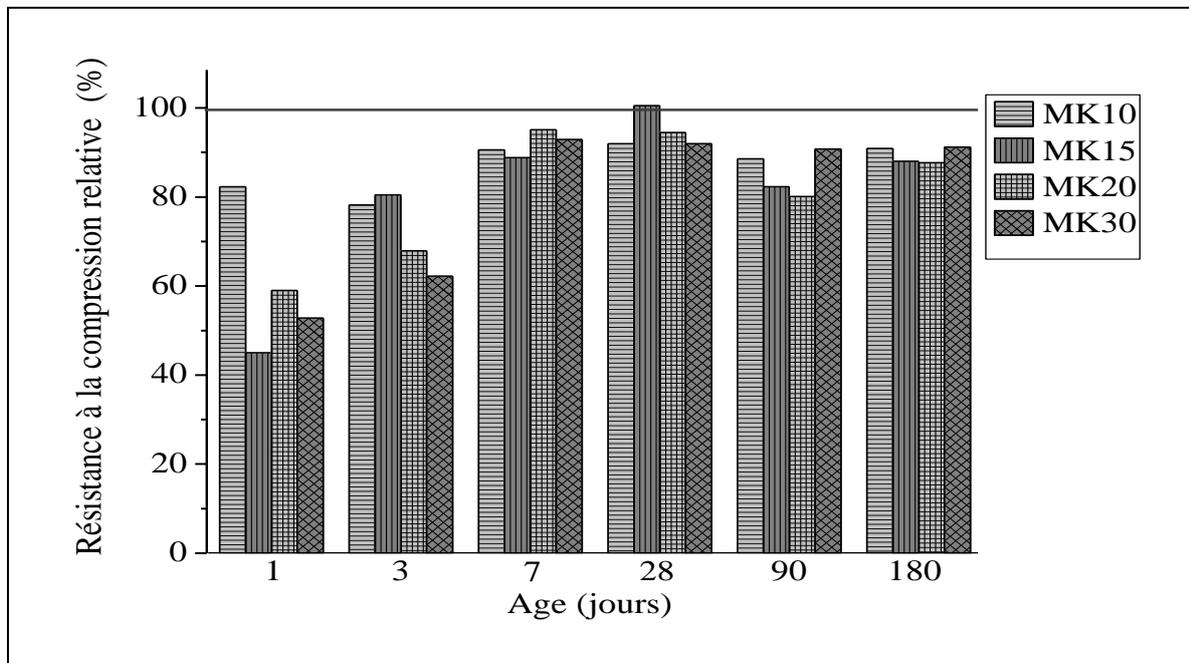


Fig III.3 : Résistance à la compression relative des mortiers en fonction de l'âge.

Tableau III.1 : Résistance à la compression des différents mortiers étudiés de 1 à 180 jours

Taux de substitution	Age (jours)					
	1	3	7	28	90	180
0% (MPa)	8.7	21	28	50	58.6	62.4
	8.8	21.8	27.8	50.5	60	65.8
	8.9	21.4	29.9	48.4	57.4	65.2
	R_{moy} = 8.8 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 21.4 $\sigma_{\text{type}} = 0.4$	R_{moy} = 28.5 $\sigma_{\text{type}} = 1.0$	R_{moy} = 49.6 $\sigma_{\text{type}} = 1.0$	R_{moy} = 59 $\sigma_{\text{type}} = 1.3$	R_{moy} = 64.5 $\sigma_{\text{type}} = 1.7$
10% (MPa)	7.2	R ₁ = 17.4	R ₁ = 24.4	R ₁ = 44.9	R ₁ = 52.2	R ₁ = 56.9
	7.5	R ₂ = 16.5	R ₂ = 25.3	R ₂ = 45.2	R ₂ = 51.3	R ₂ = 60.2
	7	R ₃ = 16.3	R ₃ = 25.4	R ₃ = 46.8	R ₃ = 53.1	R ₃ = 58.8
	R_{moy} = 7.2 $\sigma_{\text{type}} = 0.2$	R_{moy} = 16.7 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$	R_{moy} = 25 $\sigma_{\text{type}} = 1.0$	R_{moy} = 45.6 $\sigma_{\text{type}} = 0.9$	R_{moy} = 52.2 $\sigma_{\text{type}} = 0.9$	R_{moy} = 58.6 $\sigma_{\text{type}} = 1.6$
15% (MPa)	4.1	17.2	24.4	51.5	49.2	58.4
	3.8	17.3	23.8	48.2	47	57.5
	4	17.1	25.5	50	49.3	57
	R_{moy} = 3.9 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 17.2 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 24.5 $\sigma_{\text{type}} = 1.3$	R_{moy} = 49.9 $\sigma_{\text{type}} = 1.7$	R_{moy} = 48.5 $\sigma_{\text{type}} = 1.2$	R_{moy} = 57.6 $\sigma_{\text{type}} = 0.7$
20% (MPa)	5	14.4	27	47.9	47.7	56.3
	5.4	15.2	26.1	46.6	47.2	54.5
	5.6	14.1	25.7	46.6	46.5	57.5
	R_{moy} = 5.3 $\sigma_{\text{type}} = 0.3$	R_{moy} = 14.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$	R_{moy} = 26 $\sigma_{\text{type}} = 0.6$	R_{moy} = 47 $\sigma_{\text{type}} = 0.6$	R_{moy} = 47.1 $\sigma_{\text{type}} = 0.6$	R_{moy} = 56.1 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$
30% (MPa)	4.6	13.2	26.3	45.2	52.5	59.1
	4.7	13.3	25.3	45.5	54.8	59.8
	4.6	13.4	25.4	46.2	53.3	57.7
	R_{moy} = 4.6 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 13.3 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 25.7 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$	R_{moy} = 45.6 $\sigma_{\text{type}} = 1.0$	R_{moy} = 53.5 $\sigma_{\text{type}} = 1.2$	R_{moy} = 58.8 $\sigma_{\text{type}} = 1.0$

III.4 Influence du MK sur la résistance à la flexion des mortiers

Les résultats des essais de résistance à la traction par flexion effectués sur des mélanges avec différents taux de substitution de ciment par du métakaolin (0%, 10%, 20% et 30%), sont présentés dans la **figure III.4**.

Lors du jeune âge, entre 1 et 3 jours, plus le pourcentage de métakaolin augmente et plus la résistance à la flexion diminue. Ceci est dû à la réduction de la quantité de ciment et donc la réduction de la production de C-S-H. La tendance s'inverse à partir du 7^{ème} jour d'âge ou nous constatons que plus le pourcentage de métakaolin augmente et plus la résistance à la flexion est meilleure. Le MK30 produit la meilleure résistance en flexion à cet âge, par rapport aux autres mélanges qui est de 5.80 MPa en comparaison à 5.7 MPa pour le mortier témoin (MK0).

A partir de 28 jours d'âge, les mélanges incorporant du métakaolin donnent des résistances supérieures à ceux des mortiers témoins quel que soit le taux de substitution. Le MK10 donne la meilleure résistance, qui est de 8.90 MPa en comparaison à 8.85 et 8.45 MPa respectivement pour les MK30 et MK20.

A long terme, nous remarquons que l'écart de la résistance à la flexion entre les mortiers contenant du métakaolin et les mortiers témoins s'accroît. Les échantillons incorporant du MK développent une résistance d'une manière plus nette, en particulier pour le MK20 qui atteint une résistance de 10.20 MPa en comparaison à 8.50 MPa pour le mortier témoin, soit une augmentation de 20%.

Il se dégage que le metakaolin améliore plus la résistance à la flexion que la résistance en compression.

La finesse du MK qui est très élevée par rapport au ciment, améliore la compacité du liant. La matrice liante est celle qui rompt en flexion et non la matrice granulaire. Le MK permet d'obtenir des phases liantes beaucoup plus compactes donc avec moins de vide par effet filler. Cet effet permet d'obtenir des phases liantes contenant plus de matière pour résisté aux contraintes de flexion. La résistance à la traction par flexion est ainsi améliorée par ajout du MK.

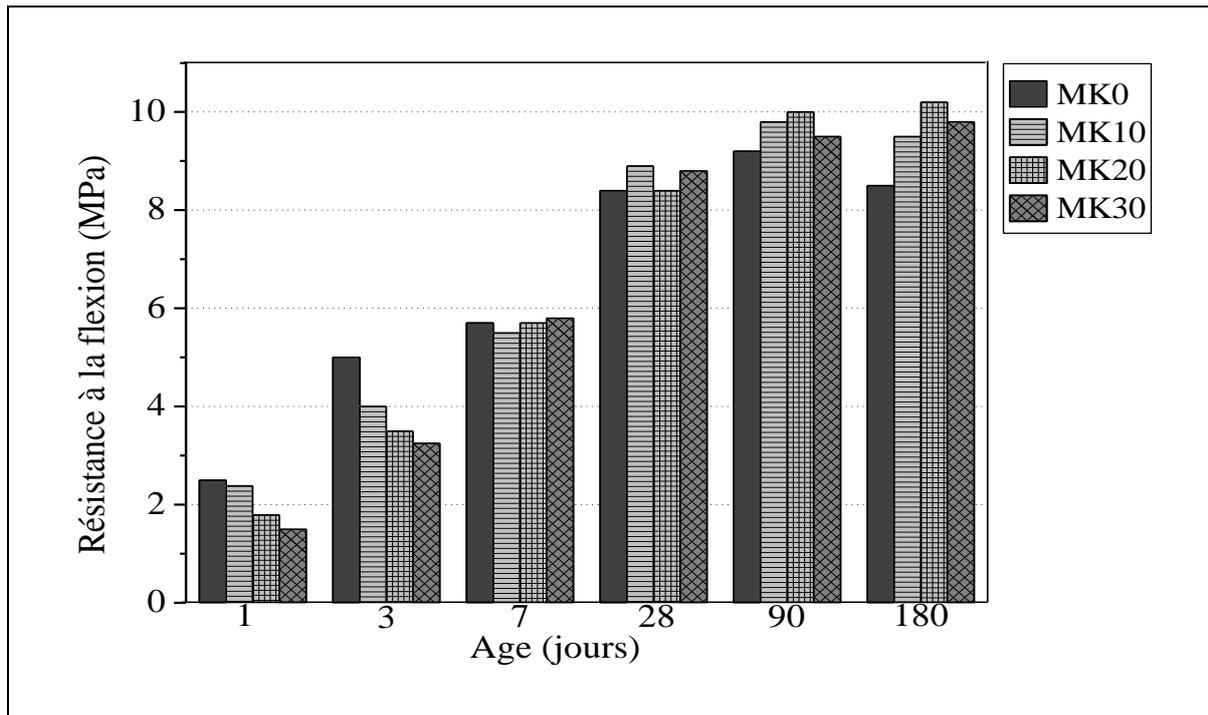


Fig III.4 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de l'âge.

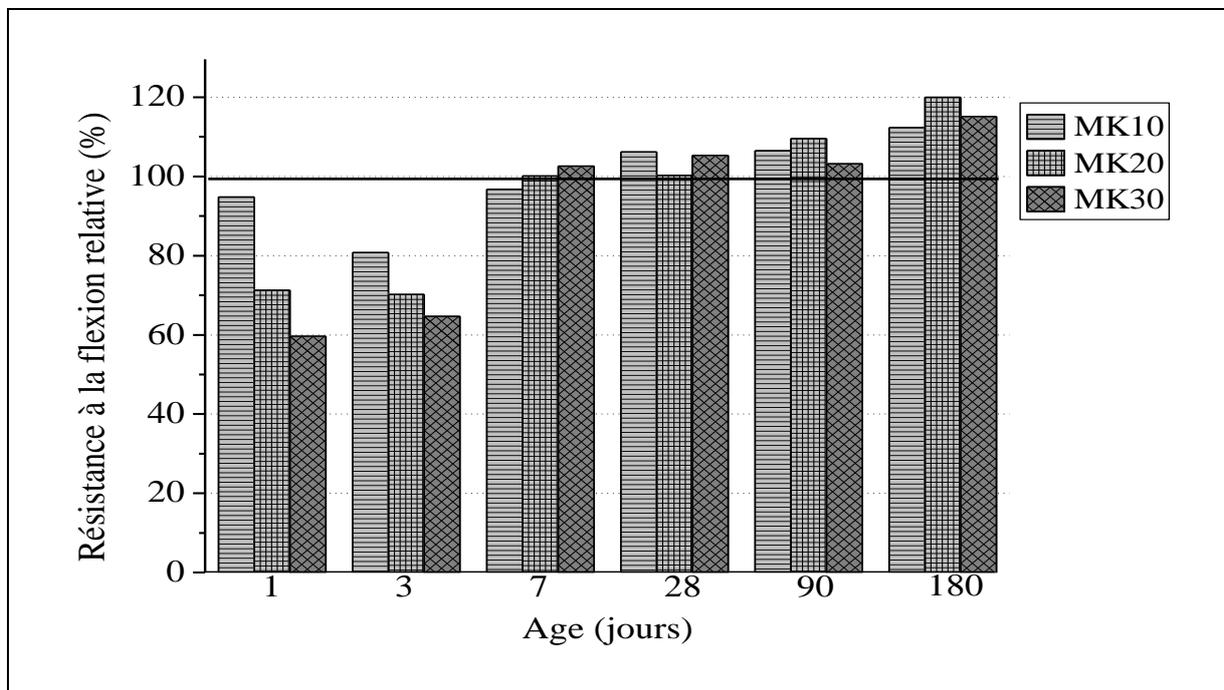


Fig III.5 : Résistance à la flexion relative des mortiers en fonction de l'âge.

Tableau III.2 : Résistance à la flexion des différents mortiers étudiés de 1 à 180 jours

Taux de substitution	Age (jours)					
	1	3	7	28	90	180
0% (MPa)	2.3	4.9	5.4	8.7	9.5	9.0
	2.6	5.1	6.0	8.3	8.7	8.5
	2.5	4.8	5.6	8.0	9.1	7.9
	R_{moy} =2.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} =5.0 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} =5.7 $\sigma_{\text{type}} = 0.3$	R_{moy} =8.4 $\sigma_{\text{type}} = 0.3$	R_{moy} =9.2 $\sigma_{\text{type}} = 0.4$	R_{moy} =8.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$
10% (MPa)	2.3	3.9	5.2	9.0	10.3	9.1
	2.3	4.3	5.5	8.6	9.0	8.9
	2.3	3.8	5.6	9.0	9.9	10.5
	R_{moy} =2.3 $\sigma_{\text{type}} = 0.0$	R_{moy} =4.0 $\sigma_{\text{type}} = 0.2$	R_{moy} =5.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.2$	R_{moy} =8.9 $\sigma_{\text{type}} = 0.2$	R_{moy} =9.8 $\sigma_{\text{type}} = 0.6$	R_{moy} =9.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.8$
20% (MPa)	1.6	3.5	5.9	7.8	9.8	10.7
	1.9	3.5	5.8	8.0	9.7	9.7
	1.7	3.5	5.3	9.2	10.7	10.2
	R_{moy} =1.8 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} =3.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.0$	R_{moy} =5.7 $\sigma_{\text{type}} = 0.3$	R_{moy} =8.4 $\sigma_{\text{type}} = 0.7$	R_{moy} =10 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$	R_{moy} =10.2 $\sigma_{\text{type}} = 0.5$
30% (MPa)	1.5	3.3	6.0	8.7	8.3	10.5
	1.5	3.1	5.7	9	9.8	8.3
	1.5	3.3	5.7	8.9	10.3	10.5
	R_{moy} =1.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.0$	R_{moy} =3.2 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} =5.8 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} =8.8 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} =9.5 $\sigma_{\text{type}} = 1.0$	R_{moy} =9.8 $\sigma_{\text{type}} = 1.1$

III.5 Influence du MK sur l'ouvrabilité des bétons

Le tableau III.3 montre l'influence du MK sur la demande en superplastifiant pour différents pourcentage de MK pour une ouvrabilité constante des bétons. On remarque toujours que le dosage en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en MK. Ceci montre l'effet négatif de l'ajout du MK sur l'ouvrabilité.

Ding and Li [15] ont montré que les mélanges contenant 5% et 10% de MK ont eu un affaissement légèrement plus élevé que celui du béton témoin. Ils montrent aussi qu'avec 15% de MK, l'affaissement du béton a diminué de 10% par rapport au béton témoin.

Tableau III.3: Les différentes combinaisons de bétons (CEM I+MK + SP) pour 1m³ de béton

Désignation	Agrégat (kg/m ³)			Liant (kg/m ³)		SP (%)	Affaissement (cm)
	S	G (3/8)	G (8/15)	CEM	MK		
	MK0	589	277	932	420		
MK10	589	277	932	378	42	0.5	9
MK15	589	277	932	357	63	0.6	6

III.6 Influence du MK sur la résistance à la compression du béton

Les résultats des essais à la compression du béton sont présentés dans la [figure III.6](#) et le [tableau III.4](#). Les résultats montrent que le métakaolin joue un rôle important dans l'accroissement de la résistance à la compression, particulièrement à long terme.

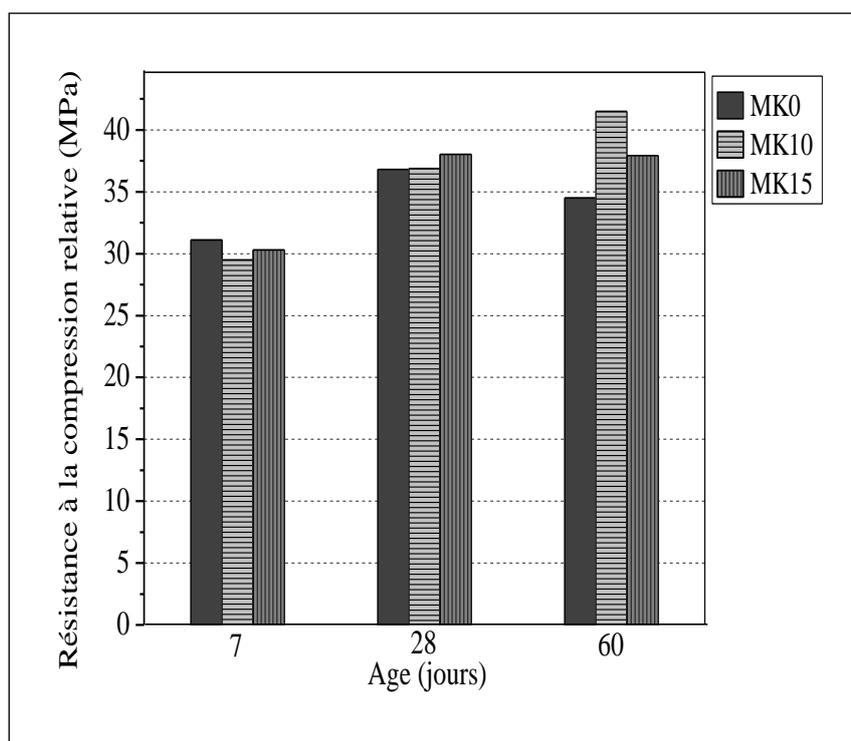


Fig III.6 : Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de l'âge.

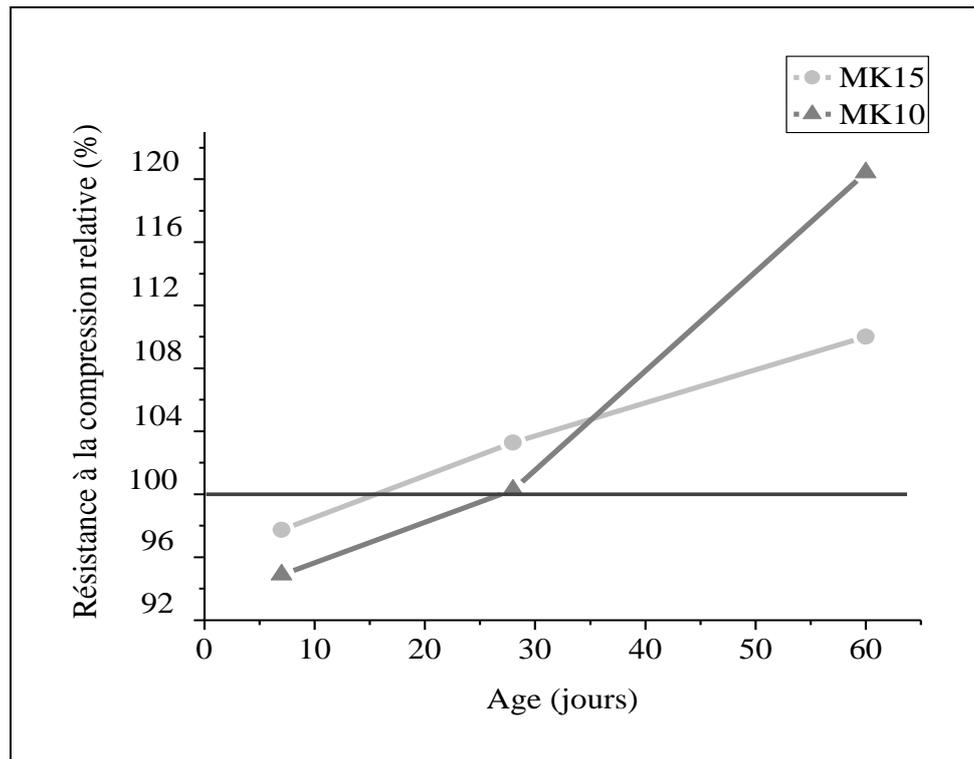


Fig III.7 : Résistance à la compression relative des bétons.

Après 60 jours de cure humide, le MK10 atteint une résistance à la compression de 41.5MPa en comparaison avec le béton témoin qui produit une résistance de 34.50 MPa, soit une augmentation de plus de 20%. Contrairement aux mortiers, le remplacement de 10% de ciment par le MK développe une résistance à la compression supérieure à celle du béton sans substitution.

La résistance du béton à la compression relative en fonction du temps est donnée sur la [figure III.7](#). Nous remarquons que l'incorporation du MK a un effet très bénéfique sur la résistance à la compression. Cette dernière reste en évolution continue surtout pour le MK10, qui donne les meilleures performances à long terme.

L'influence de la substitution du ciment par les différents taux de métakaolin a été nettement plus efficace dans les bétons que dans les mortiers. Ceci s'explique par l'interaction pâte granulat et par l'effet de remplissage. L'interaction pâte granulats dans les bétons provoque une porosité plus importante dans la matrice liante par rapport au mortier à cause de la dimension

des granulats qui est beaucoup plus grande dans le béton. Par conséquent l'effet filler du MK a plus d'effet sur la matrice liante du béton que celle du mortier.

Gu'neyisi et Mermerdas [16] ont étudié l'influence de la teneur en MK (10% et 20%) et du rapport E/L (0.55 et 0.35) sur le développement de la résistance à la compression des bétons jusqu'à 120 jours d'âge. Ils trouvent que la résistance aux jeunes âges (1 à 7 jours) et à long terme (120 jours) des bétons contenant le MK sont respectivement de 5% à 23% et 10% à 30% plus élevées que la résistance du béton témoin. Ils trouvent aussi qu'à 28 jours, la diminution du rapport E/L provoque une augmentation de 25% de la résistance du béton contenant 10% MK par rapport au béton témoin.

Tableau III.4 : Résistance à la compression des différents bétons étudiés

Taux de substitution	Age (jours)		
	7	28	60
0% (MPa)	31.0	36.5	35.5
	31.1	37.1	34.0
	31.2	36.8	34.0
	R_{moy} = 31.1 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 36.8 $\sigma_{\text{type}} = 0.3$	R_{moy} = 34.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.7$
10% (MPa)	28.8	37.2	42.5
	30.0	36.0	40.7
	29.7	37.5	41.3
	R_{moy} = 29.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.6$	R_{moy} = 36.9 $\sigma_{\text{type}} = 0.7$	R_{moy} = 41.5 $\sigma_{\text{type}} = 0.9$
15% (MPa)	30.5	39.9	38.6
	30.2	36.2	37.0
	30.2	37.9	38.1
	R_{moy} = 30.3 $\sigma_{\text{type}} = 0.1$	R_{moy} = 38 $\sigma_{\text{type}} = 0.6$	R_{moy} = 37.9 $\sigma_{\text{type}} = 0.8$

III.7 Effet du métakaolin sur l'absorption d'eau par capillarité des bétons

Les résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité effectués sur des éprouvettes de béton sont donnés dans les figures III.8 et III.9.

Le coefficient de sorptivité en accord avec la norme ASTM C1585 – 11 [17] est obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$I = C + S\sqrt{T} \quad \text{avec} \quad I = \frac{Q}{A \times \gamma_w} \quad \dots\dots(5)$$

I : Indice d'absorption (cm)

Q : Quantité d'eau absorbé

A : Section carrée de l'échantillon en contact avec l'eau

γ_w : Masse volumique de l'eau

T : Temps en seconde

C : Coefficient constant

S : Coefficient de sorptivité de l'échantillon ($m/s^{1/2}$).

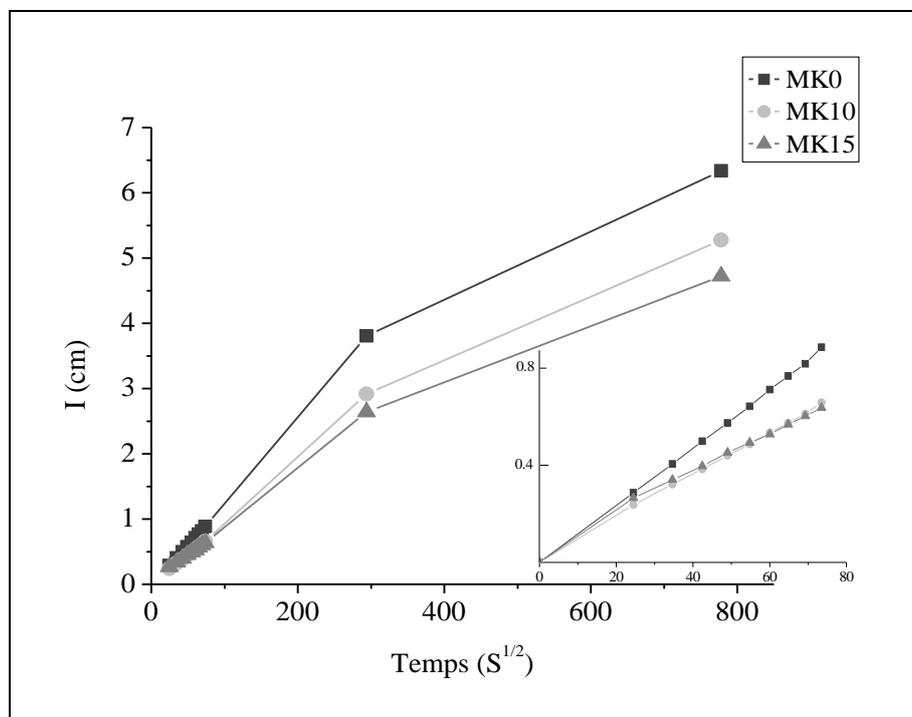


Fig III.8 : Absorption d'eau capillaire des différents mélanges de béton en 7 jours.

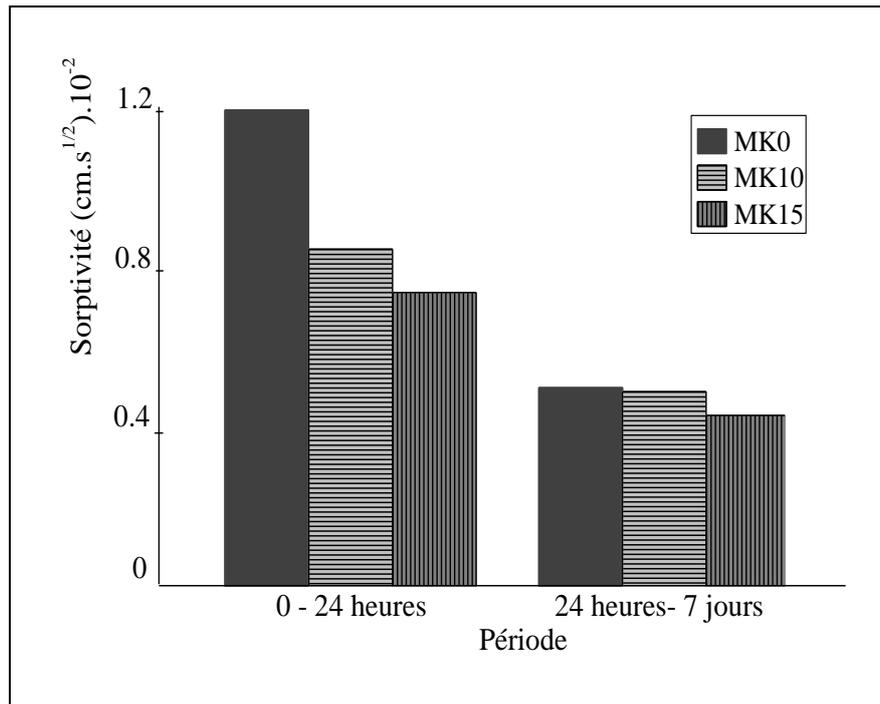


Fig III.9 : Sorptivité des différents mélanges de béton en 7 jours.

Ces résultats montrent que l'absorption d'eau capillaire diminue avec l'augmentation du dosage en métakaolin surtout durant les premières 24 heures d'essai. Ce qui signifie que l'incorporation du métakaolin a un effet très positif sur l'absorption d'eau par capillarité. Il est noté de même que le coefficient d'absorption capillaire, diminue avec l'augmentation de la substitution de ciment par du métakaolin. Les bétons MK10 et MK15 réduisent le coefficient d'absorption capillaire par rapport au béton de référence MK0 respectivement de 30% et 40%. Les valeurs de sorptivité obtenus après 60 jours de cure humide sont de 0.012, 0.0085, et 0.0074 $\text{cm/s}^{1/2}$ respectivement pour MK0, MK10 et MK15.

La diminution de la quantité d'eau absorbée et de la sorptivité avec l'ajout du métakaolin peut être expliquée par la structure des pores plus raffinée. L'impact du MK a eu plus d'effet durant les premières 24 heures, probablement en raison de la diminution des macropores. Les résultats de sorptivité comparables obtenus entre 24 heures et 7 jours d'essai sont probablement dus à une augmentation des micropores dans les mélanges à base de MK. [Courrard \[18\]](#) trouve une relation entre le coefficient d'absorption et le rayon moyen des pores (figure III.10). Il relève une diminution du coefficient d'absorption avec la diminution du rayon moyen de la porosité, en conformité avec la loi de Poisseuille.

D'autres publications rapportent que les substitution de 10% et 15% de ciment par du métakaolin raffinent la structure des pores et réduisent la sorptivité [\[5, 6, 16, 19, 20\]](#).

Khatib et Clay [1] ont étudié l'absorption de l'eau par capillarité par immersion totale des bétons contenant le métakaolin. Cinq mélanges de béton, contenant 0% à 20% de métakaolin. La teneur croissante du métakaolin a eu comme conséquence la diminution du coefficient d'absorption d'eau. Pour tous les mélanges, le CAE a diminué brusquement jusqu'à 14 jours de cure humide.

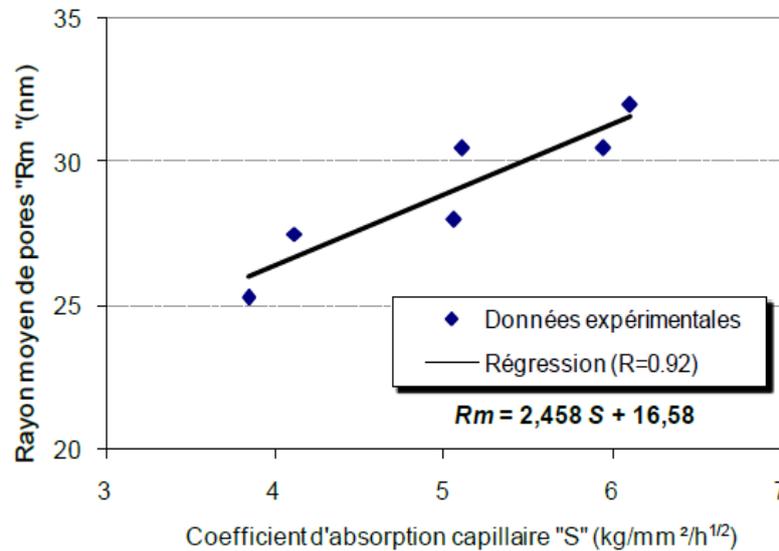


Fig III.10 : Corrélation entre le coefficient d'absorption et le rayon moyen des pores [18].

III.8 Effet du métakaolin sur la pénétration d'eau sous pression

Un des principaux facteurs de la durabilité du béton est la perméabilité à l'eau. Un béton avec une perméabilité plus faible procure une meilleure résistance contre les attaques chimiques. Lorsque l'eau pénètre dans le béton, certains sels solubles s'introduisent avec l'eau et provoquent la corrosion des armatures. La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de sa porosité. Elle dépend aussi de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et de la continuité des pores.

Les résultats de la perméabilité à l'eau sous un gradient de pression de 3 bars pendant une période de 24 heures sont illustrés dans les figures III.11 et III.12.

On remarque que l'incorporation du métakaolin a un effet très positif sur la perméabilité de l'eau sous pression. Le MK10 présente les meilleurs résultats avec une diminution de l'ordre de 25%, différemment du MK15 qui diminue la perméabilité d'environ 15% en comparaison avec les bétons témoins.

Cela peut s'expliquer par l'effet positif du métakaolin qui se traduit par l'amélioration de la structure des pores avec un meilleur remplissage des grands pores capillaires, et par conséquent une perméabilité est réduite.

Plusieurs chercheurs ont montré que la perméabilité d'eau sous pression dans les bétons peut être réduite jusqu'à 50%, quand on incorpore 10% à 15% de métakaolin [5, 20].

Khatib et Wild [21] ont trouvé que l'incorporation du métakaolin a donné une amélioration de la structure des pores. Ils ont trouvé que le raffinement du système de pores se produit à partir de 14 jours d'âge. Les auteurs l'attribuent à une couche enveloppant les particules de métakaolin produite par la réaction du métakaolin avec la portlandite.

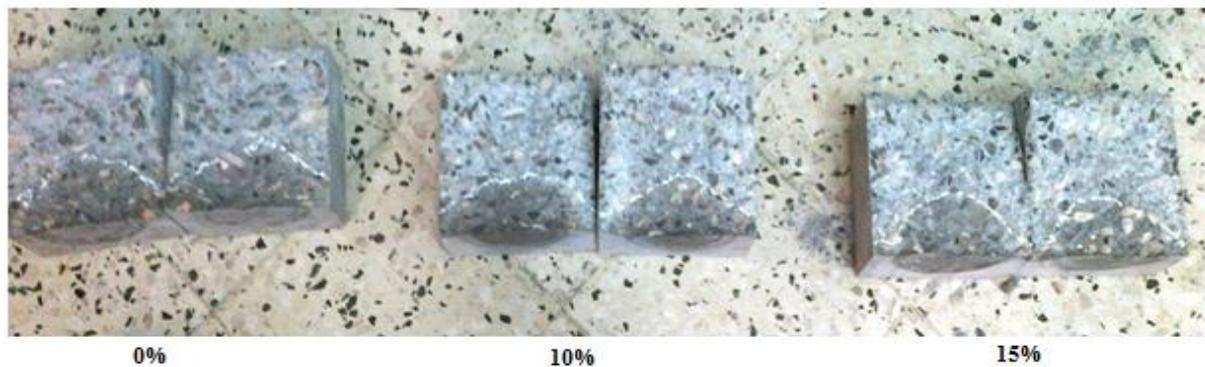


Fig III.11 : *Profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons à base de MK.*

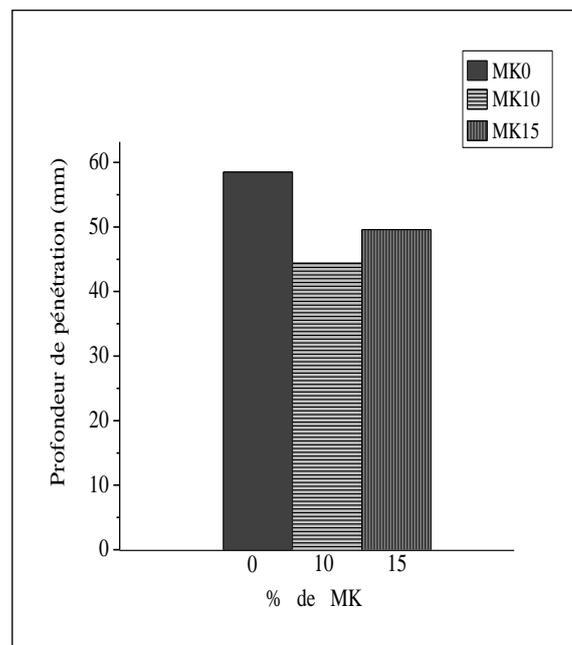


Fig III.12 : *Résultats de pénétration d'eau sous pression dans les bétons.*

III.9 Effet du métakaolin sur la perméabilité au gaz des bétons

Les paramètres mécaniques et de durabilité étudiés ont été améliorés dans leur ensemble à travers la substitution du ciment par du métakaolin dans les bétons. La figure III.13 montre cette fois-ci que le métakaolin joue un rôle moins important pour la résistance à la perméabilité au gaz dans les bétons.

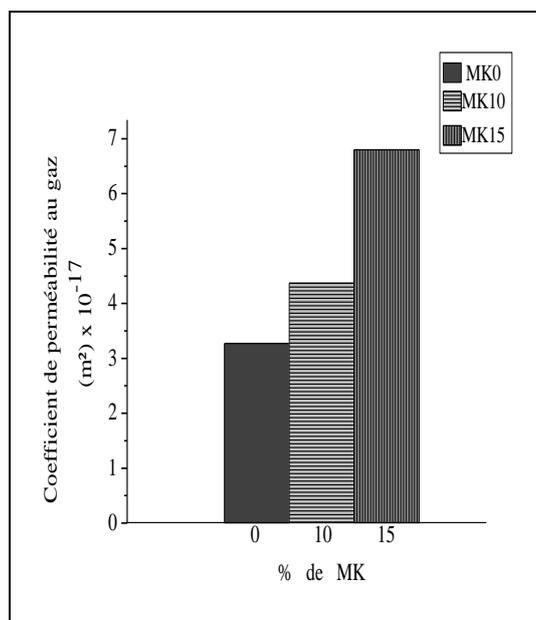


Fig III.13 : Résultats de perméabilité au gaz dans les bétons.

Les valeurs du coefficient de perméabilité au gaz mesuré sont de $3.27 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, $4.37 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ et $6.80 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ respectivement pour les MK0, MK10 et MK15.

La légère augmentation du coefficient de perméabilité au gaz due à l'incorporation du métakaolin est probablement conséquente au réarrangement et à la connexion des pores favorisant le passage de l'air.

Des résultats contradictoires ont été rapportés par [Badogiannis and Tsvilis \[22\]](#) qui ont utilisé deux types de métakaolin, un métakaolin commercial et un métakaolin de faible qualité. Ces auteurs ont trouvé que le béton avec MK est moins perméable au gaz que le béton témoin. Le béton avec MK a présenté une perméabilité au gaz qui varie de 1.35×10^{-16} à $1.85 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ pour une substitution respectivement de 10% à 20% de ciment par du MK tandis que le béton témoin a présenté une perméabilité de $2.94 \times 10^{-16} \text{ m}^2$. L'amélioration des paramètres de transfert et de résistance à la pénétration de gaz par l'incorporation du métakaolin a aussi été rapporté par d'autres chercheurs [\[19, 20, 23\]](#).

III.10 Effet du métakaolin sur la résistance aux sulfates de sodium, magnésium et à l'eau de mer

Le comportement du béton dans un environnement chimiquement agressif dépend de multiples facteurs définis, d'une part, par la qualité du milieu (nature, concentration et fréquence de renouvellement) et, d'autre part, par la nature du matériau (type du liant, composition, conditions de cure,...). Généralement, un béton durable, est un béton suffisamment dosé en ciment et très compact. Cependant, le respect d'exigences supplémentaires, notamment le choix du liant, est nécessaire pour maîtriser les attaques provenant d'un milieu chimiquement agressif comme par exemple les eaux sulfatées ou l'eau de mer. L'objectif de ce chapitre est d'observer la tenue des mortiers en métakaolin, soumis après maturation en cure humide, à des solutions de sulfates de sodium et de magnésium ainsi que l'eau de mer.

L'expansion mesurée par la variation de longueur des éprouvettes de mortiers à différents taux de substitution de ciment en métakaolin, immergées dans les solutions de sulfate de sodium, de sulfate de magnésium à 5% de concentration, et dans l'eau de mer est représentée sur les **figures III.14 ; III.15 et III.16**. On remarque qu'après 18 semaines d'immersion il n'existe pas d'expansion des éprouvettes.

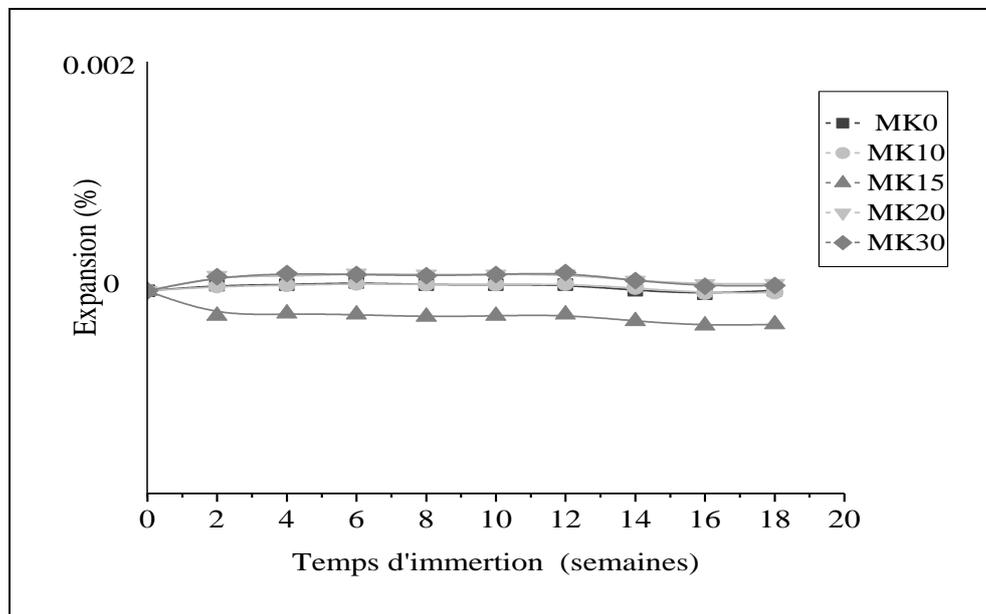


Fig III.14 : Expansion des mortiers dans la solution de sulfate de sodium (5% Na_2SO_4).

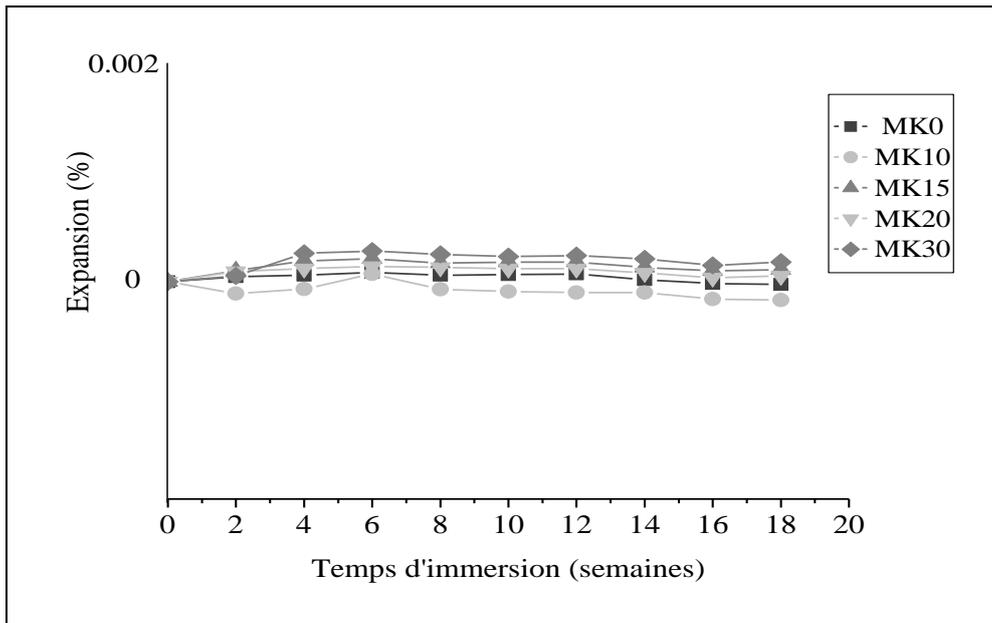


Fig III.15 : Expansion des mortiers dans la solution de sulfate de magnésium (5% $MgSO_4$).

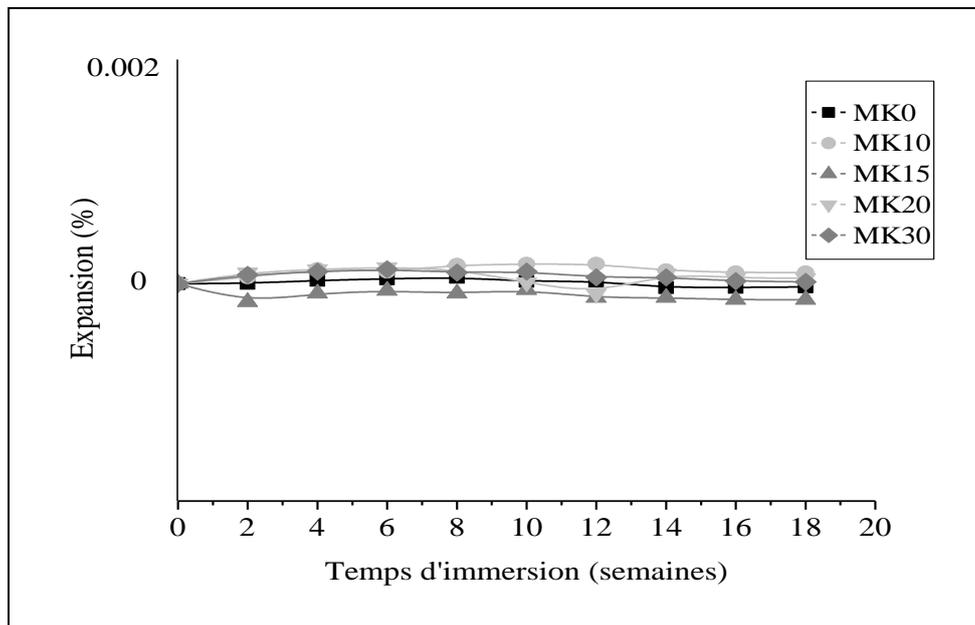


Fig III.16 : Expansion des mortiers dans l'eau de mer.

Dans un ciment durci, l'aluminate de calcium hydraté peut réagir d'une façon semblable avec un sulfate extérieur. Le produit de cette réaction est le sulfoaluminate de calcium qui se forme à l'intérieur de la structure de la pâte hydratée. Une augmentation de 227% du volume de la phase solide provoque la dégradation graduelle du béton [24]. Une réaction secondaire est également occasionnée par l'échange de base entre l'hydroxyde de calcium et les sulfates.

L'utilisation dans notre étude d'un ciment ayant un faible pourcentage de C_3A , a retardé l'expansion.

Ce qu'on peut conclure de ces essais c'est que la substitution jusqu'à 30% en métakaolin d'un ciment résistant aux sulfates n'a pas perturbé la résistance des mortiers à ces mêmes solutions sulfatées après 18 semaines d'immersion.

III.11 Conclusion

Les résultats des essais expérimentaux effectués dans cette étude sur l'effet de la substitution de ciment par le métakaolin à différents taux, sur le comportement des mortiers et bétons nous amène aux conclusions suivantes :

- ✓ Les mortiers et bétons subissent des pertes d'ouvrabilité due à l'incorporation du métakaolin d'où la nécessité d'utiliser un superplastifiant.
- ✓ On peut produire en substituant jusqu'à 30% de ciment par du métakaolin des liants de même classe de résistance que les ciments sans substitution.
- ✓ L'effet positif de l'incorporation du métakaolin sur la résistance à la compression commence à apparaître à partir du 7^{ème} jour d'âge et le MK10 semble donner les meilleures performances.
- ✓ Les résistances à la flexion ont été améliorées par l'incorporation du métakaolin et le MK20 semble donner les meilleures performances.
- ✓ La substitution de ciment résistant aux sulfates n'a pas provoqué de chute de résistance en milieu agressif sulfaté.
- ✓ Tous les paramètres de durabilité ont été améliorés par l'incorporation de 10% et 15% de métakaolin dans les bétons, excepté la perméabilité au gaz. L'influence du métakaolin sur la cinétique d'absorption d'eau par capillarité demeure très positif quel

que soit le taux de substitution. Cependant le MK15 donne la plus faible sorptivité ($0.0074 \text{ cm/s}^{1/2}$) par rapport à ($0.012 \text{ cm/s}^{1/2}$) pour le béton de référence. La présence du métakaolin dans le béton a réduit la perméabilité à l'eau jusqu'à 25% en comparaison avec les bétons témoins.

Références bibliographique

- [1] Khatib J.M. and Clay R.M., "Absorption characteristics of metakaolin concrete", *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, N° 1, pp. 19-29.
- [2] Said-Mansour M., Kadri E.H., Kenai S., Ghrici M., Bennaceur R., "Influence of calcined kaolin on mortar properties", *Construction and building materials*, 2011, Vol. 25, N° 5, pp. 2275- 2282.
- [3] Dubey A. and Banthia N., "Influence of high-reactivity metakaolin and silica fume on the flexural toughness of high-performance steel fiber-reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, 1998, Vol. 95, N° 3, pp. 284-292.
- [4] American Society for Testing Material, International Standardization. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM C 618-03. (2003).
- [5] Ramezani-pour A.A. and Bahrami J.H., "Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes", *Construction and Building Materials*, 2012, Vol. 30, pp. 470-479.
- [6] Parande A.K., Ramesh B.B., Karthik M.A., Kumar K.K., Palaniswamy N., "Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar", *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, N° 3, pp. 127-134.
- [7] Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L., "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite", *Cement and Concrete Research*, 2011, Vol. 41, N° 1, pp. 113-122.
- [8] Sfikas I.P., Badogiannis E.G., Trezos K.G., "Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin", *Construction and Building Materials*, 2014, N° 64, pp. 121-129.
- [9] Shen P., Lu L., Chen W., Wang F., Hu S., "Efficiency of metakaolin in steam cured high strength concrete" *Construction and Building Materials*, 2017, Vol. 152, N° 15, pp. 357-366.
- [10] Wild S., Khatib J.M., Jones A., "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete", *Cement and Concrete Research*, 1996, Vol. 26, N° 10, pp. 1537-1544.
- [11] Santos F.N., Gomes de Sousa S.R., Bombard A.J.F., Vieira S.L., "Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments", *Construction and Building Materials*, 2017, N° 143, pp. 92-103.
- [12] Badogiannis E., Kakali G., Dimopoulou G., Chaniotakis E., Tsivilis S., "Metakaolin as a main cement constituent", *Cement and Concrete Composites*, 2005, Vol. 27, N° 2, pp. 197-203.

- [13] Khatib J.M., Sabir S., Wild S., “Some properties of MK paste and mortar” Concrete for environmental enhancement and Protection, Ed. Dhir R K. and Dyer T.D., London.1996.
- [14] Brooks J.J. and Johari M.A.M., “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete”, Cement and Concrete Composites, 2001, Vol. 23, N° 6, pp. 495-502.
- [15] Ding J.T. and Li Z. J., “Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete”, ACI Materials Journal, 2002, Vol. 99, N° 4, pp. 393-398.
- [16] Güneyisi E. and Mermerdas K., “Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin”, Materials and Structures, 2007, Vol. 40, pp. 1161-1171.
- [17] ASTM C1585-11., “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes” American society for testing material. (2011).
- [18] Courard L., “Contribution to the analysis of the parameters influencing the creation of the interface between the concrete and repair system”, PhD thesis, University of Liege, Belgium, 1999.
- [19] Badogiannis E.G., Sfikas I.P., Voukia D.V., Trezos K.G., Tsivilis S.G., “Durability of metakaolin, Self-Compacting Concrete”, Construction and Building Materials, 2015, N° 82, pp. 133-141.
- [20] Shekarchi M., Bonakdar A., Bakhshi M., Mirdamadi A., Mobasher B., “Transport properties in metakaolin blended concrete”, Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, N° 11, pp. 2217-2223.
- [21] Khatib J.M. and Wild S., “Pore size distribution of metakaolin paste”, Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, N° 10, pp. 1545-1553.
- [22] Badogiannis E. and Tsivilis S., “Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete”, Cement and Concrete Composites, 2009, Vol. 31, pp.128-133.
- [23] Cassagnabere F., “Les produit préfabriqué en béton file”, PhD thesis, University of Toulouse 3, 2007.
- [24] Neville A., “Properties of concrete”, Editor Eyrolles; Collection Published, September 2000.

Chapitre IV

Résultats et Analyse, Déchets de Brique

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les résultats sur le comportement des pâtes et mortiers à base des fines de déchets de brique.

IV.2 MEB sur les fines de déchets de brique

Les photos de microscopie à balayage (**Figure IV.1**) montrent que les fines obtenues après le broyage des déchets de brique, ont en général des formes plutôt cubiques angulaires, avec différents dimensions, de diamètre inférieur à 80 μm , et une surface externe rugueuse et poreuse.

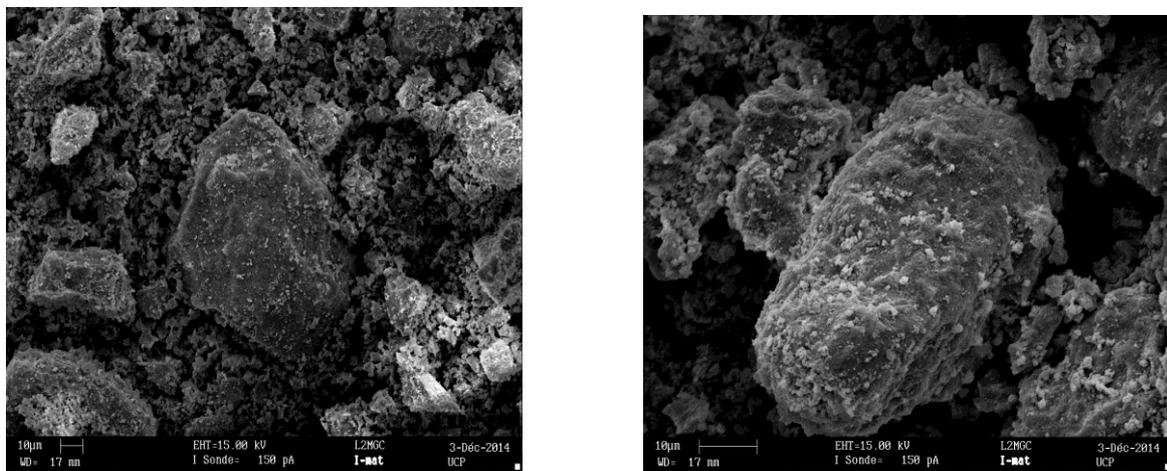


Fig IV.1 : Photos MEB des déchets de brique broyés.

IV.3 DSC/ATG appliqué sur les différents poudres (Brique, CEM I, CEM II)

Lors d'une analyse calorimétrique/gravimétrique, les composants du produit, sont soumis à de hautes températures : ils se décomposent et libèrent de l'eau et/ou du dioxyde de carbone. La mesure de ces différentes pertes de masse permet d'évaluer la part d'eau ayant réagi lors de la fabrication de ces matériaux.

Lors d'une analyse calorimétrique différentielle, menée en parallèle de l'analyse thermo gravimétrique, la présentation de l'évolution du flux thermique permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés. Chaque pic endothermique peut être attribué à une phase hydratée.

Exemple : - Le pic à 575°C correspond au quartz (la silice)

- Le pic à 766°C correspond à la calcite.

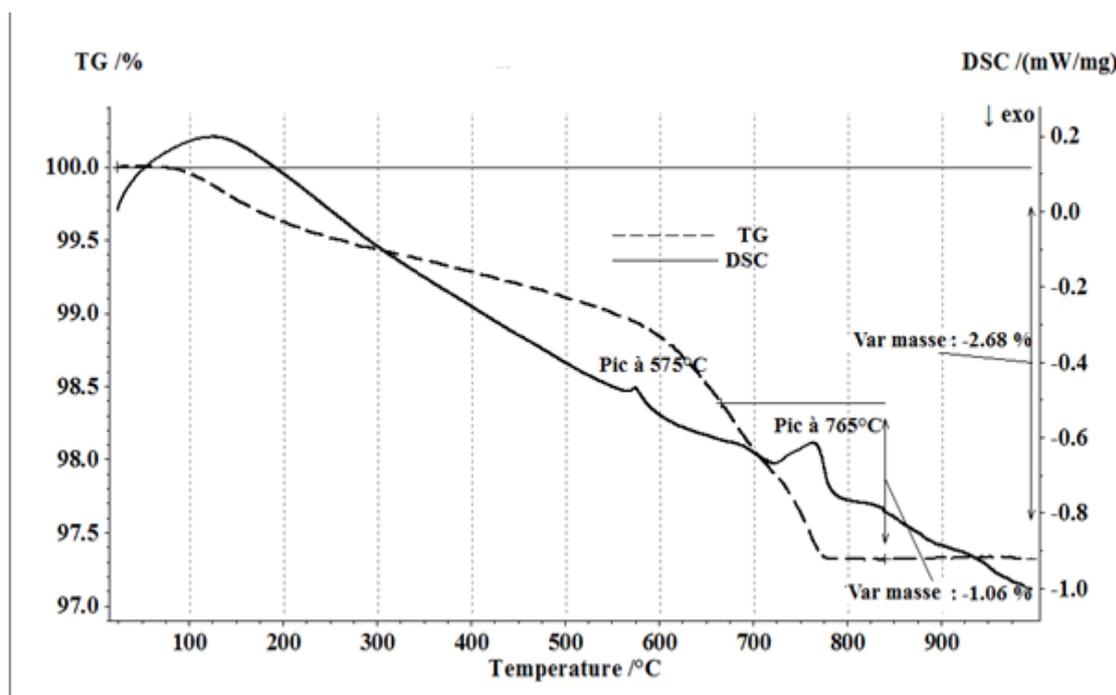


Fig IV.2 : Analyse calorimétrique différentiel des fines de brique.

La figure IV.2 montre les résultats de l'analyse calorimétrique différentielle de la fine de brique.

On remarque que le pic de la calcite pour la fine de déchets de brique, apparaît à la température de 766°C. Etant donné que les briques sont des matériaux qui ont déjà reçu un traitement thermique lors de leur fabrication, ils ne sont pas censés réagir face à la chaleur, sauf si la température dépasse celle de leur calcination initiale. Le pic de la calcite apparaissant autour de la température de 766°C, il devient évident que la température maximale utilisée pour la fabrication de ces briques était d'environ 760°C.

Il est à remarquer de même, que la perte de masse totale est de 2.68% alors que la perte de masse correspondant à la réaction de la calcite est de 1.06%. Ces résultats dépendent du temps de calcination utilisé lors de la fabrication des briques. Ces taux peuvent diminuer, par exemple, avec l'augmentation de la durée de calcination à l'usine.

Les figures IV.3 et IV.4 montrent les résultats de l'analyse calorimétrique différentielle des deux ciments utilisés CEM I 52.5 et CEM II A-L 42.5.

Les figures IV.3 et IV.4 montrent qu'entre 100-200°C la variation de la masse est légèrement supérieure pour le CEM I par rapport au CEM II, en raison de la plus grande quantité de clinker dans le CEM I, et donc plus de C_2S et de C_3S .

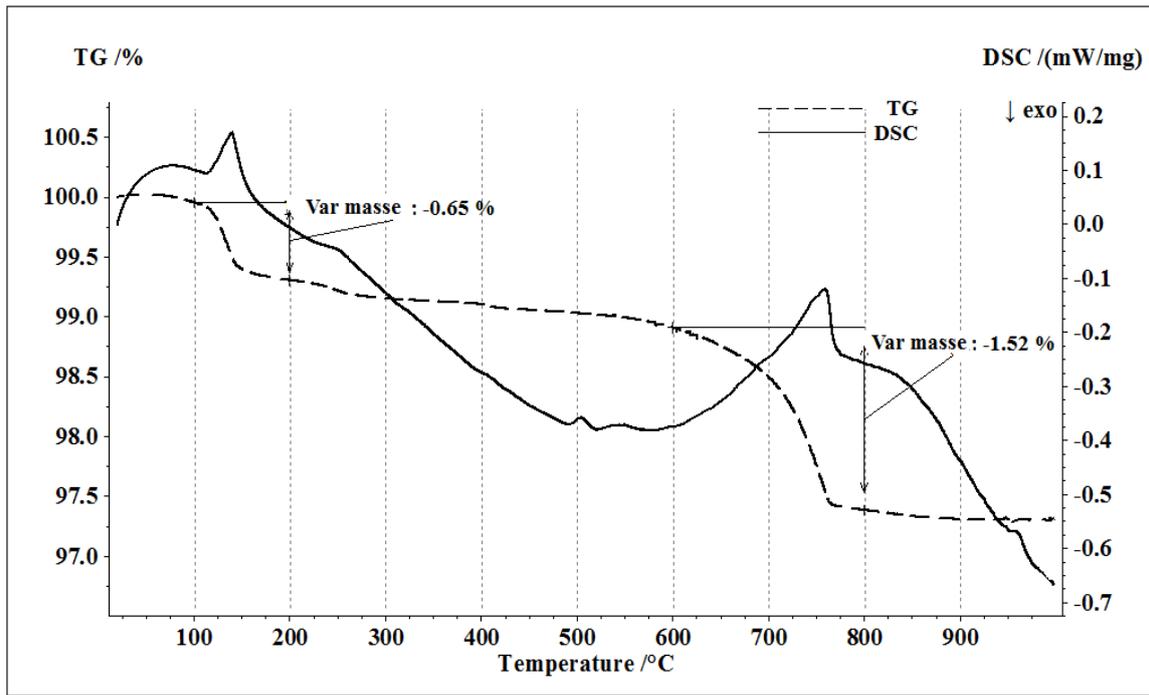


Fig IV.3 : Analyse calorimétrique différentielle du CEM I.

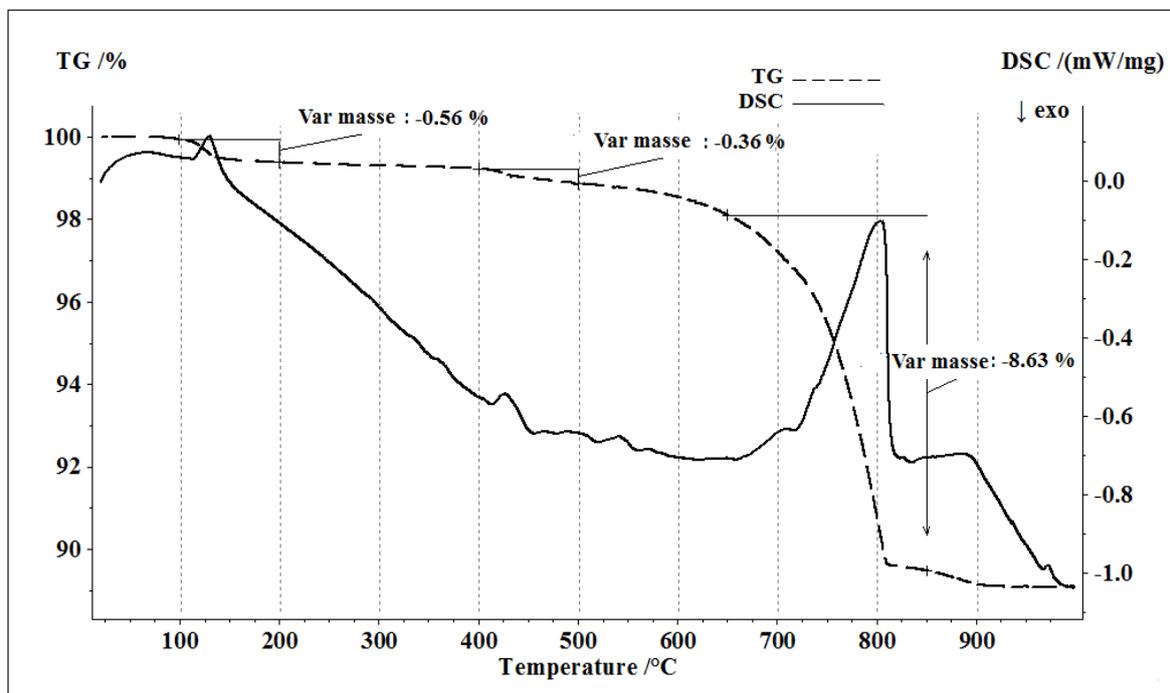


Fig IV.4 : Analyse calorimétrique différentielle du CEM II.

Entre 400-500°C, l'on remarque que dans le CEM II, il y a une très légère perte de masse associée à un pic DSC qui est du à la formation d'une petite quantité de portlandite issue du calcaire présent dans ce ciment.

De 650-850°C, nous constatons qu'il y'a une grande différence de perte de masse entre les deux ciments, 8.63% pour le CEM II et 1.52% pour le CEM I. La présence d'une quantité importante de calcaire (environ 20%) dans le CEM II favorise le pic DSC et la perte de masse dans cette zone de température. Cette perte de masse représente la transformation du calcaire (CaCO_3) en chaux vive (CaO) par la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

IV.4 Essai de consistance

Les résultats des essais de l'effet de substitution du ciment CEM II, par les fines de déchets de brique sur la consistance des pâtes sont présentés dans le [tableau IV.1](#) et [figure IV.5](#).

Tableau IV.1 : Consistance des pâtes avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de déchets de brique

Taux de substitution	E/L	D (mm)
0%	0.28	6.5
5%	0.285	7
10%	0.29	6
15%	0.295	6

La [figure IV.5](#) montre que plus le taux de substitution du ciment par les déchets de brique augmente et plus la consommation d'eau augmente. Il existe de même une relation linéaire entre le taux de substitution du ciment par les déchets de brique et la consommation d'eau. Cela s'explique par le caractère adsorbant des argiles. L'eau est adsorbée dans la surface externe des particules argileuses et reste coincée entre ces feuilletts. Plus on augmente la quantité des fines de brique dans la pâte et plus la consommation en eau augmente. Il est à noter que dans notre cas la consommation en eau est très faible par rapport à d'autres additions cimentaires à caractère pouzzolanique comme les métakaolins par exemple, c'est pour cette raison qu'il a été retrouvé cette relation linéaire.

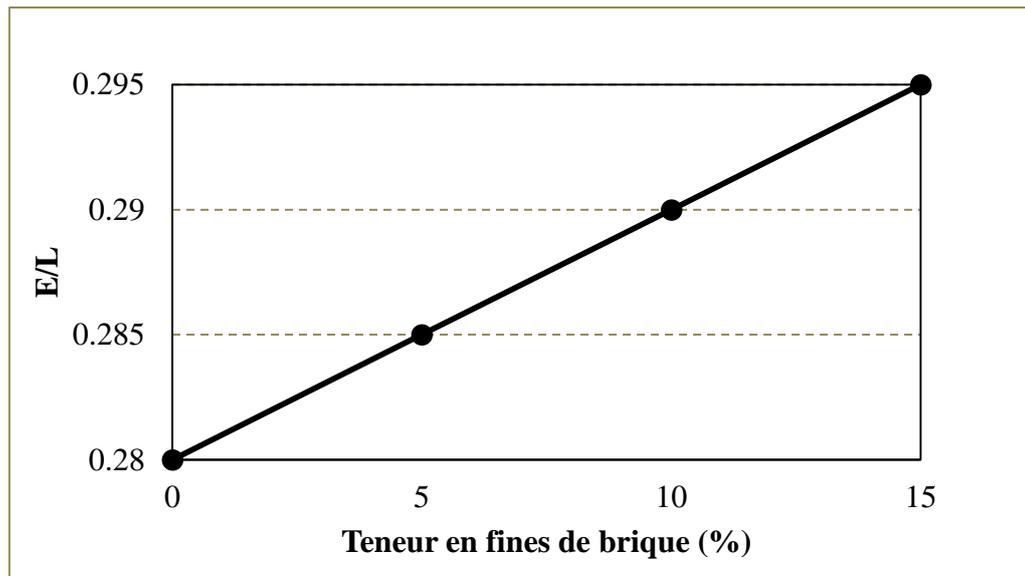


Fig IV.5 : Relation entre la consistance et les différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de brique.

Debieb et Kenai [1] qui ont remplacé le sable naturel avec des déchets de brique dans le béton à différents taux de substitution (0%, 25%, 50%, 75% et 100%), ont également trouvé une relation linéaire entre l'augmentation de la consommation en eau et l'augmentation de la substitution du sable par les déchets de brique afin de maintenir une ouvrabilité constante.

IV.5 Début et fin de prise des pâtes

Le temps écoulé entre l'addition de l'eau dans le mélange cimentaire et le début de solidification, représente le début de prise. C'est une limite pour la manipulation du béton frais. Beaucoup de facteurs influencent la prise comme le dosage en liant, la consistance, la finesse, ainsi que la température de cure [2].

Les essais de début et fin de prise, sont effectués sur des pâtes de ciment avec différents taux de substitution de ciment en DB (0%, 5%, 10% et 15%), et une consistance normale constante pour l'ensemble des pâtes. Les résultats des essais sont présentés dans le [tableau IV.2](#) et les [figures IV.6 et IV.7](#).

On remarque d'une manière générale que la prise est retardée en fonction de l'augmentation des taux de substitution de ciment par les DB.

Tableau IV.2 : Temps de début et fin de prise des pâtes de ciments avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de déchets de brique

Taux de substitution	Début de prise	Fin de Prise
0%	3h12min	5h18min
5%	3h40min	06h00min
10%	4h02min	06h05min
15%	4h12min	06h15min

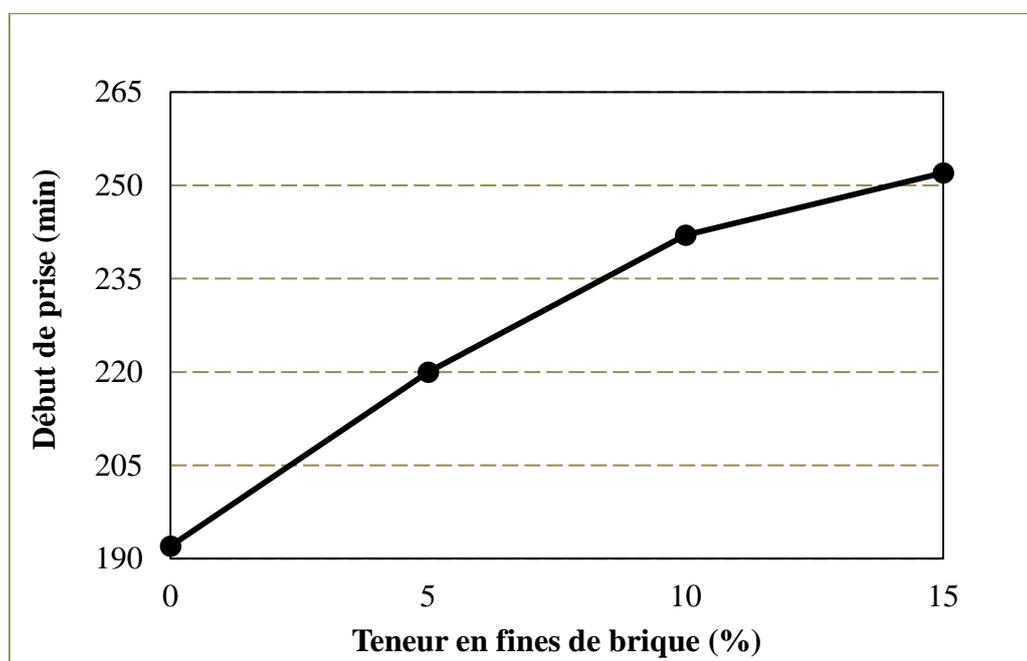


Fig IV.6 : Début de prise des pâtes avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de brique.

La **figure IV.6** montre l'influence de la substitution du ciment par la fine de déchets de brique sur la durée de début de prise. On constate que plus le taux de substitution de ciment par les DB augmente et plus la durée de début de prise augmente. Le début de prise pour la pâte de référence est de 3h et 12minutes. Le début de prise est retardé d'environ 30 min pour 5% de DB et 20 minutes pour celui de 10% de DB. Sachant que la norme nous autorise une tolérance d'erreur de plus au moins 5 minutes.

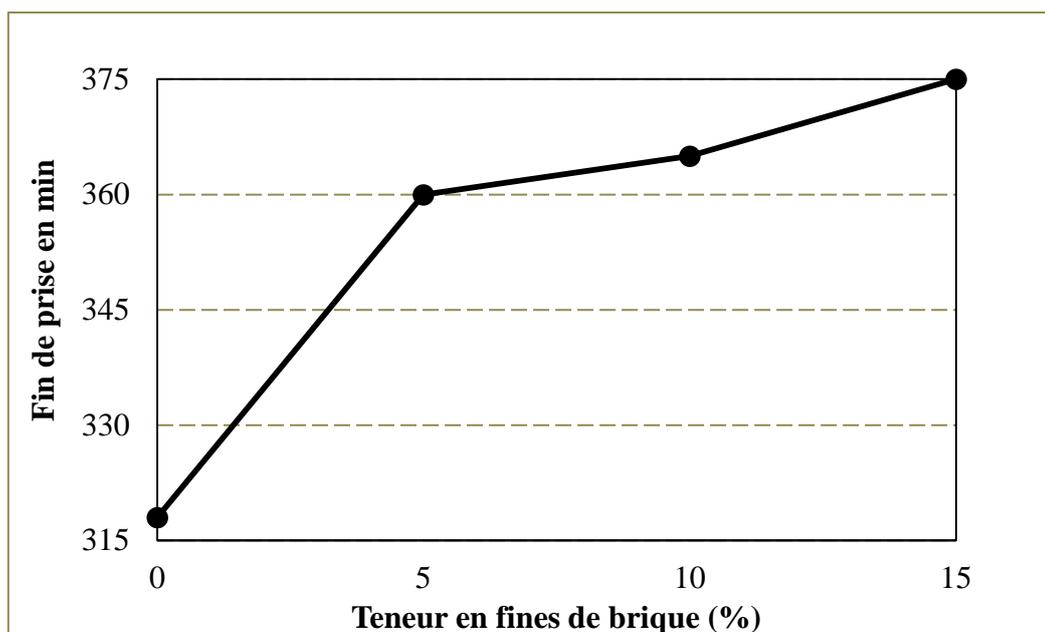


Fig IV.7 : *Fin de prise des pâtes avec différents taux de substitution de ciment CEM II par les fines de brique.*

La **figure IV.7** montre l'influence de la teneur en DB sur la fin de prise des pâtes. On constate que la fin de prise des pâtes à base de DB est retardée et que plus le taux de substitution augmente, plus cette fin de prise est retardée. La fin de prise pour la pâte de référence est de 5 heures et 18 min, tandis que celle de 5% de DB est de 6 heures. A 15% de DB, la fin de prise est retardée de 15 minutes par rapport à celle de 5% de DB.

Il existe un certain nombre de paramètres qui influencent directement le début et la fin de prise. On peut citer notamment la température du milieu extérieur, l'humidité, la consistance, la nature des ajouts cimentaires et la finesse des ajouts. Dans notre cas, nous avons utilisé les mêmes conditions d'essai et une consistance normale constante pour l'ensemble des mélanges. De plus, la finesse de l'ajout cimentaire utilisé est comparable à celle du ciment, et par conséquent, seule la nature de l'ajout cimentaire est responsable de la variation du temps de début et de fin de prise. Les briques qui sont fabriquées à partir de la calcination d'argile, réduisent et ralentissent l'activité cimentaire à court terme et donc retardent l'hydratation du ciment. Cela peut être dû à trois causes. La première est la faible réactivité des DB à court terme. La seconde est la réduction de la quantité de ciment par la substitution par les DB. La troisième cause est la réduction de la quantité de filler calcaire présent dans le CEM II, puisque les fillers calcaires accélèrent l'hydratation des ciments à travers une dissolution plus rapide des C_3S en particulier au jeune âge.

Brooks et al. [2] ont étudié l'effet de différents ajouts cimentaires pouzzolaniques sur la prise des bétons de haute résistance. Il s'agit de la fumée de silice, du métakaolin, du laitier, ainsi que des cendres volantes. Ils ont constaté que l'ensemble de ces ajouts retarde le début et la fin de prise. On outre plus le taux de substitution est important et plus la prise est retardée.

D'autres chercheurs [3-5] qui ont utilisé de la fumée de silice en substitution au ciment, ont expliqué que les retards de prise et d'hydratation sont causés par la réduction de la quantité du ciment et la faible réactivité de ces additions cimentaires pouzzolaniques au jeune âge.

Bentz et al. [6] ont trouvé que la substitution par 5% de ciment à base de cendres volantes par des fillers nano-calcaires réduit le temps de prise et augmente la chaleur d'hydratation au jeune âge.

IV.6 Influence des fines de brique sur l'ouvrabilité des mortiers

Les résultats des essais d'ouvrabilité d'étalement à la table à chocs sont donnés dans le tableau IV.3. Ces résultats montrent que l'incorporation des fines de brique jusqu'à 15% en substitution de ciment, réduit le diamètre d'étalement jusqu'à 1.5 cm au maximum. Chaque substitution de 5% de ciment en fines de brique nécessite une addition de 1.8% d'eau. Ces résultats montrent que les finesses de brique provoquent une très légère perte d'ouvrabilité. Pour maintenir une ouvrabilité parfaitement constante avec un étalement de mortier de 17.5 cm pour l'ensemble des mélanges tout en gardant un rapport eau/ciment constant de 0.5, le dosage en (SP) a été augmenté.

Contrairement au métakaolin qui a une finesse élevée, les fines de brique ont une finesse comparable à celle du ciment utilisé. La réduction de l'étalement est due principalement à la consommation d'une partie de l'eau de malaxage par les fines de déchets de brique. Cette partie d'eau reste bloquée entre les feuillets de l'argile. Il est à noter aussi que cette quantité d'eau absorbée par les déchets de brique est beaucoup plus faible que celle consommée par le MK plus fin.

Bektas et al [7] ont utilisé les déchets de brique en substitution de sable dans les mortiers à des taux variable. Ils trouvent que la tendance de la perte de fluidité est presque linéaire pour des taux substitution de 0%, 10%, 20% et 30%. Ceci a été expliqué par la grande capacité d'absorption de la brique en eau qui affecte significativement la fluidité des mortiers. La brique est un matériau qui contient des pores dont la porosité peut atteindre 40% en fonction de la

matière première et des processus de fabrication. Par conséquent, les granulats qui seraient fabriqués à partir de briques posséderont alors une absorption d'eau élevée.

Tableau IV.3 : Les différentes combinaisons (Ciment + brique + SP)

Désignation	Combinaisons (%)		Quantités (g)		S.P (g)
	Ciment	DB	Ciment	DB	
DB0	100	00	450	00	/
DB5	95	5	427.5	22.5	0.13
DB10	90	10	405	45	0.27
DB15	85	15	382.5	67.5	0.4

IV.7 Influence des DB sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de CEM II

La Figure IV.8 montre l'évolution de la chaleur d'hydratation durant les premiers 5 jours (120 heures) pour les différents taux de substitution en DB. La figure IV.9 présente le flux de chaleur dégagé pendant les premiers 70 heures.

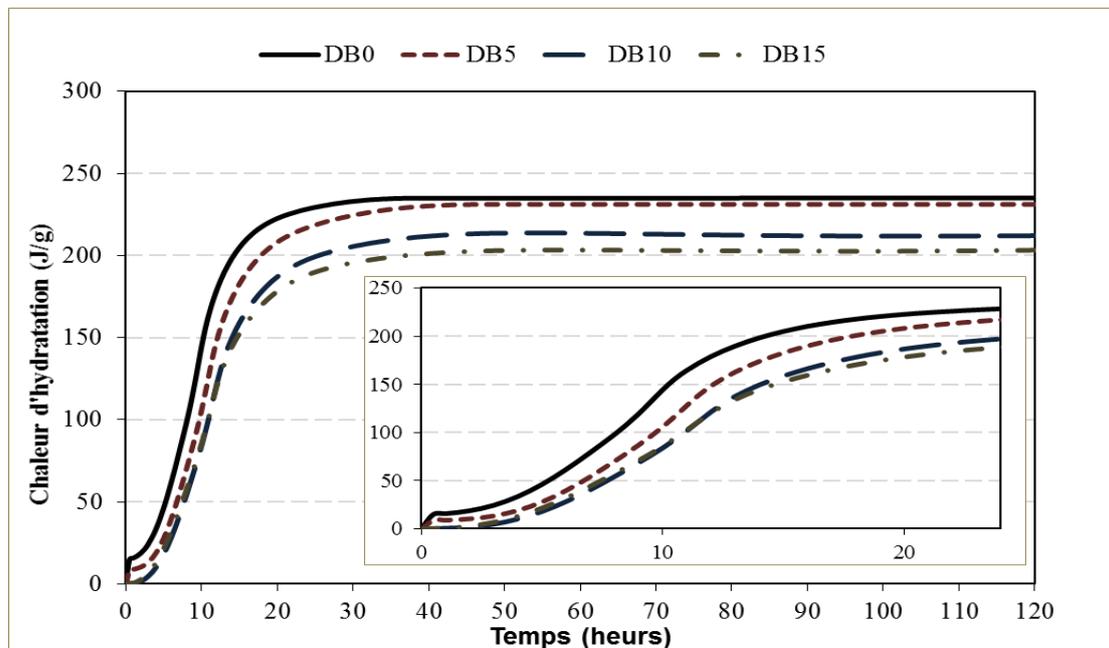


Fig IV.8 : Influence des fines de brique sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment CEM II.

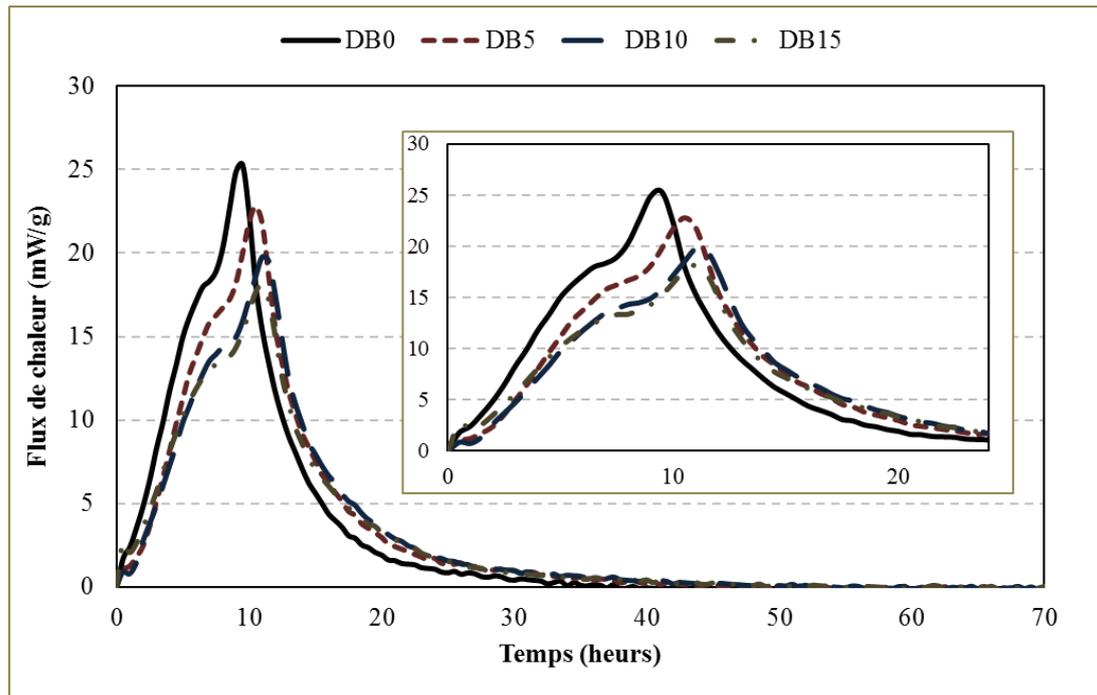


Fig IV.9 : Influence des fines de brique sur le flux de chaleur des mortiers à base de ciment CEM II.

De nombreux facteurs influencent la chaleur d'hydratation, comme le rapport E/C, la température initial du mélange, les additions minérales et la finesse du liant.

L'hydratation d'un ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur, dont l'intensité et la cinétique sont directement liées à la composition chimique du liant et aux réactions d'hydratation. L'élévation de la température du mortier normalisé est mesurée en continu par calorimétrie semi adiabatique (dite méthode du calorimètre de Langavant). La chaleur d'hydratation est alors calculée comme la somme de la chaleur accumulée dans le vase Dewar et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant.

Dans le cas des liants composés, il s'agit de déterminer si les réactions d'hydratation des deux constituants sont indépendantes ou si les phénomènes sont liés. Pour cela, les courbes de calorimétrie vont permettre de voir s'il y a continuité des dégagements de chaleur.

Les essais de chaleur d'hydratation ont été effectués sur des mortiers à base de déchets de brique en fines à différents taux de substitution de ciment : 0%, 5%, 10% et 15%. Les essais ont été effectués dans une chambre climatique maintenant une température constante à l'intérieur de la chambre à 20°C et une humidité relative de 50%.

On remarque que plus le taux de substitution de ciment CEM II par les fines de DB augmente et plus la chaleur dégagée est réduite. Le mortier de référence produit une chaleur d'hydratation évaluée à 235 J/g. Le DB5 atteint une chaleur de 231,5 J/g, tandis que les DB10 et DB15 produisent respectivement des quantités de chaleur de 214 et 203 J/g. On déduit que la substitution de 5, 10 et 15% de ciment CEM II par les fines de déchets de brique réduisent la chaleur dégagée respectivement de 1.5%, 9% et 13.5%.

La figure IV.9 représentant les flux de chaleur pour l'ensemble des mélanges, montre que plus le taux de substitution de ciment CEM II par les fines de déchets de brique augmente et plus le pic du flux de chaleur diminue. On remarque aussi que l'apparition de ces pics est retardée par l'incorporation des fines de brique, sauf pour le DB10 et DB15 où le temps de leur apparition semble converger. Les flux de chaleur enregistrés pour les DB0, DB5, DB10 et DB15 atteignent respectivement : 25.30 J/g.h, 22.8 J/g.h, 19.8 J/g.h et 18.10 J/g.h.

Etant donné que la température a été maintenue constante pendant la durée de l'essai, et que les fines de brique possèdent une finesse presque identique à celle du ciment utilisé, il est déduit que la réduction de la quantité de chaleur dégagée et la réduction du flux de chaleur par l'incorporation des fines de brique peut être attribuée à la diminution de l'activité cimentaire. L'hydratation du ciment à travers l'hydratation des différents composants et en particulier le C_3S produisent de la chaleur, et la substitution d'une partie de ciment par une autre quantité de fines de brique, réduit la quantité de C_3S , et par conséquent la chaleur dégagée sera réduite. L'effet des argiles calcinées apparaît surtout sur le long terme. On note aussi que le DB5 ne réduit que légèrement (1.5%) la chaleur dégagée. Cette légère réduction est probablement due à la légère diminution du filler calcaire qui est connu pour son accélération de l'hydratation des C_3S à court terme. Les retards enregistrés dans l'apparition des pics du flux de chaleur pour les mélanges avec DB confirment les retards des temps de prise. Le début et fin de prise ont été aussi retardés, prouvant ainsi que les fines de brique ralentissent légèrement l'hydratation à court terme.

Sato et Beaudoin [8], ont montré que l'addition d'un nano-calcaire dans la matrice liante d'un ciment contenant une cendre volante de classe F, accélère les réactions d'hydratations au jeune âge. Les mélanges avec une matrice liante sans calcaire présentent un retard significatif par rapport aux mélanges témoins (100% de ciment Portland).

De Weerdt et al. [9] quant à eux trouvent que l'utilisation d'un calcaire plus grossier avec une taille de particules, médiane d'environ 5 μm , ne produit pas d'accélération des réactions d'hydratation au jeune âge de la matrice cimentaire contenant une cendre volante de classe F.

Aqel et Panesar [10] ont étudié l'effet de finesse et de taux de substitution des fillers calcaire sur la chaleur d'hydratation des mélanges cimentaires. Ils trouvent que la chaleur d'hydratation augmente avec l'augmentation de la finesse jusqu'à 1125 m^2/kg , et avec des taux de substitution jusqu'à 15%.

IV.8 Influence des DB sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de CEM I

L'évolution de la chaleur d'hydratation et du flux de chaleur pour les mortiers à base de ciment CEM I sont données dans les figures IV.10 et IV.11.

La figure IV.10 présente la chaleur dégagée de l'ensemble des mélanges, à base de différents taux de substitution du ciment CEM I par les fines de déchets de brique : 0 à 15%. Contrairement à l'utilisation du CEM II, le DB5 dans le cas du CEM I, augmente la chaleur d'hydratation dégagée par rapport au mortier sans ajout. Les DB10 et DB15 ont la même tendance que dans le cas des CEM II, c'est-à-dire la réduction de la chaleur d'hydratation en comparaison toujours au DB0. On remarque aussi que la chaleur dégagée atteint les 300 J/g pour les mélanges à base de CEM I tandis que le maximum atteint dans le cas des mélanges à base du CEM II était de 235 J/g. La chaleur dégagée produite par les mélanges DB0, DB5, DB10 et DB15 sont respectivement de 290 J/g, 303 J/g, 273 J/g et 266 J/g. On peut déduire que la chaleur d'hydratation a augmenté d'environ 4% pour le DB5, et a été réduite pour les DB10 et DB15 respectivement de 6% et 8% par rapport au mortier de référence.

La figure IV.11 présente les flux de chaleur produits par les mélanges à base de CEM I et de fines de déchets de brique. On constate que les courbes de flux de chaleur sont très similaires pour le DB0 et le DB5, même si le pic de ce dernier dépasse légèrement celui du mortier témoin. Les pics de flux de chaleur ont baissé pour les DB10 et DB15 par rapport au mortier témoin. Le décalage dans l'apparition des pics de flux de chaleur des différents mélanges n'est pas aussi important que dans le cas précédent (ciment CEM II). Certains pics apparaissent presque au même moment comme pour le cas des DB0 et DB5 ou le DB10 et DB15. Les pics des flux de chaleur atteints par les DB0, DB5, DB10 et DB15 sont respectivement de 44, 45, 40 et 38 J/g.h.

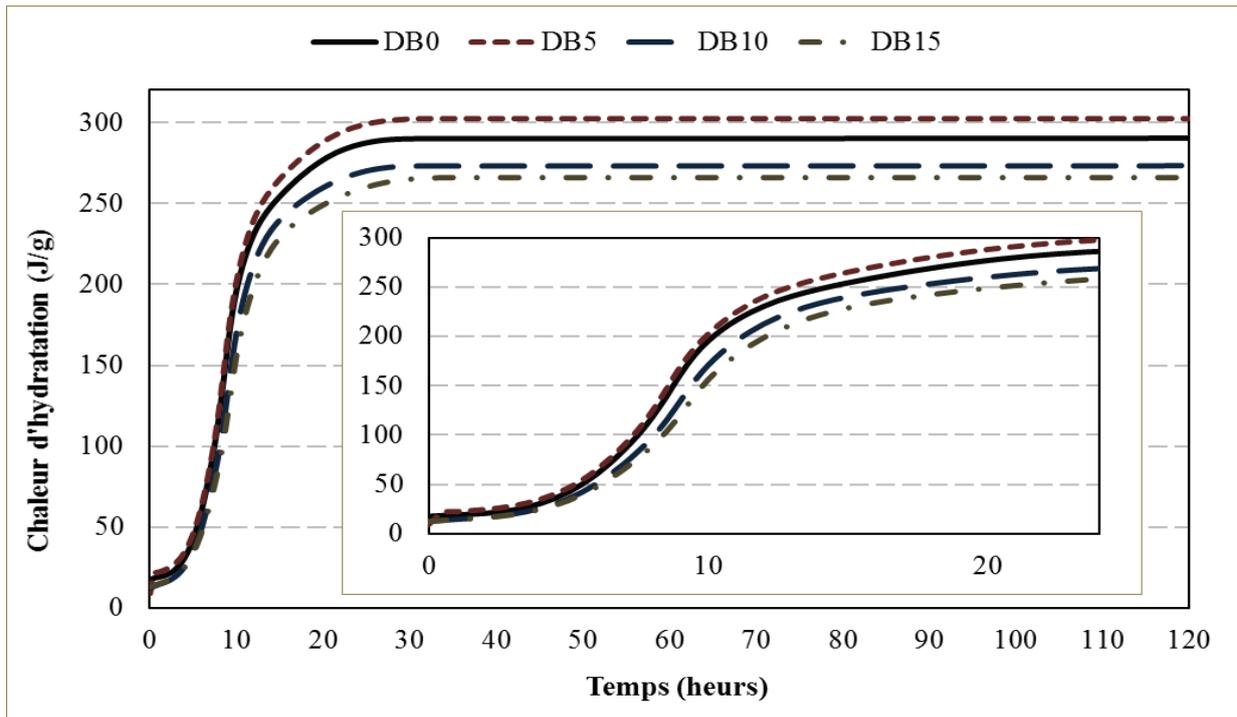


Fig IV.10 : Influence des fines de brique sur la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment CEM I.

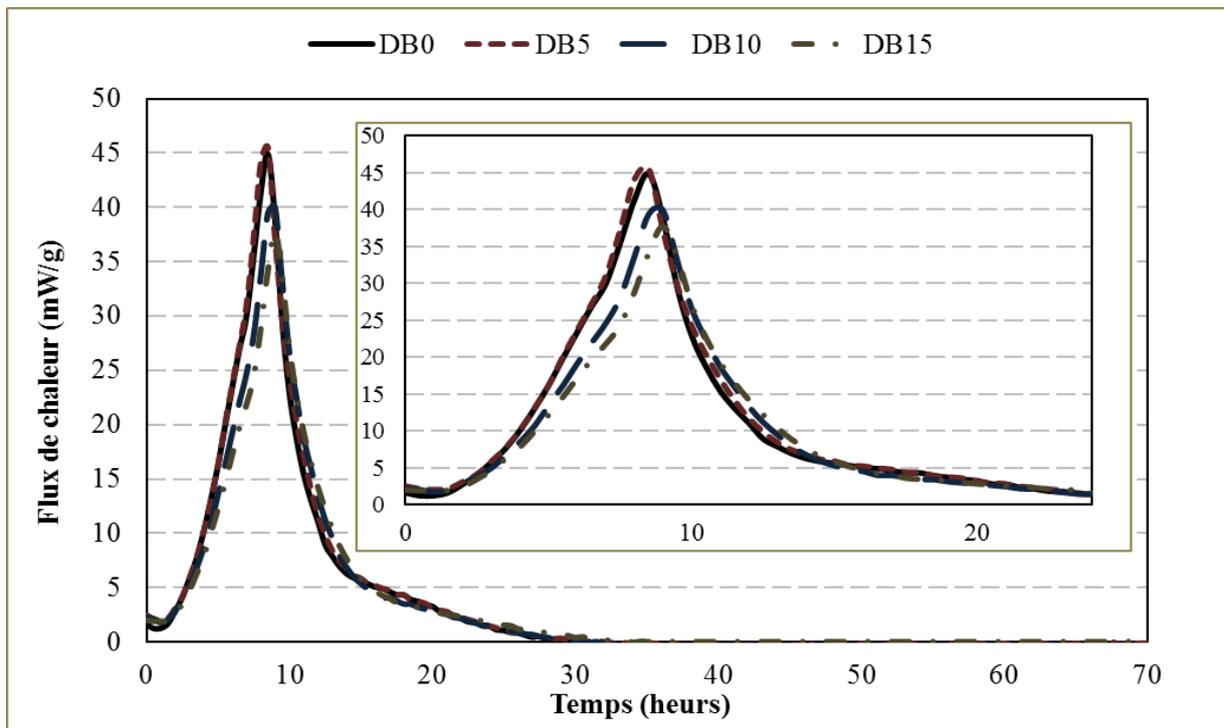


Fig IV.11 : Influence des fines de brique sur le flux de chaleur des mortiers à base de ciment CEM I.

L'augmentation de la chaleur dégagée d'environ 4% pour le DB5 en comparaison avec le mortier de référence, signifie que la substitution de 5% de ciment CEM I par les fines de déchets de brique améliore légèrement les réactions d'hydratation de ce ciment. Cette augmentation de la chaleur dégagée semble due à la réaction pouzzolanique des DB et la combinaison avec le clinker pour former plus de C-S-H en consommant de la portlandite [11,12]. Les réactions d'hydratation des ciments CEM I serait ainsi favorisées par la présence de 5% de fines de déchets de brique dans les mélanges. La réduction de la chaleur dégagée pour les DB10 et DB15 est vraisemblablement due à la réduction de la quantité de clinker substituée par les fines de brique. La présence de moins de clinker dans les mélanges signifie qu'il y'aura moins de production de C-S-H et donc moins de dégagement de chaleur. Ceci dit, une présence d'une bonne proportion de clinker et d'argile calcinée peut favoriser les réactions d'hydratation, comme dans le cas du DB5.

Les DB5, DB10 et DB15 ont été moins performants dans le CEM II par rapport au CEM I d'une manière générale du fait de la présence d'une quantité de calcaire d'environ 20% du ciment; ce qui neutralise l'action des argiles calcinées dans ces ciments à court terme. L'augmentation de la quantité de chaleur dégagée dans les mélanges à base de ciment CEM I par rapport aux mélanges à base de ciment CEM II peut être expliquée par la faible quantité de clinker de ces derniers. Le décalage dans l'apparition des pics de flux de chaleur dans les mélanges à base de CEM II contrairement aux mélanges à base de CEM I peut s'expliquer par la réaction du calcaire présent dans les ciments CEM II à court terme avec l'argile calcinée, retardant ainsi l'activité cimentaire de l'ensemble du mélange.

Said-Mansour et al [13] ont trouvé que la substitution de 10% de ciment par du kaolin calciné à une température de 850°C pendant une durée 3 heures, augmente la chaleur d'hydratation dégagée. Cela a été expliqué par l'aspect exothermique de la réaction chimique du métakaolin avec le ciment lors de l'hydratation et la réactivité du MK optimisé par une température de calcination adéquate lors de sa préparation.

Ambroise et al. [14] ont rapporté que la substitution de ciment par 10%, 20% et 30% de ciment par du métakaolin, augmente la chaleur d'hydratation respectivement de 8°C, 6°C et 1°C, par rapport au mortier de référence.

Frías et al. [15] ont étudié l'influence des différents ajouts cimentaires à caractère pouzzolanique sur la chaleur d'hydratation. Les chaleurs totales dégagées (jusqu'à 120 h) ont

diminué de manière significative avec l'augmentation de la substitution de ciment par les cendres volantes. Elles ont augmenté légèrement avec la substitution de 10% de fumée de silice, et restent pratiquement constantes pour les niveaux croissants de MK.

IV.9 Suivi de l'hydratation des liants par l'analyse thermique

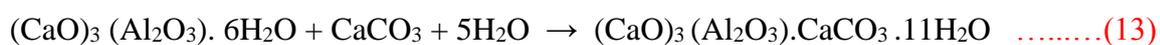
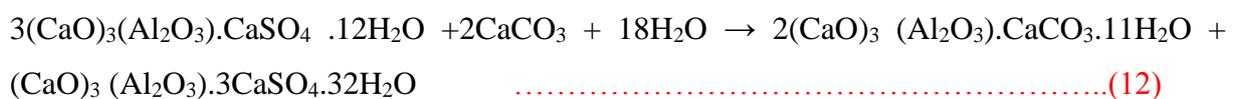
Le but de ces essais est de suivre et d'analyser l'évolution de l'hydratation des ciments à différents taux de substitution en fines de déchets de brique jusqu'à 180 jours d'hydratation.

Lors d'une analyse thermogravimétrique, les produits d'hydratation du ciment sont soumis à de hautes températures : ils se décomposent et libèrent de l'eau et/ou du dioxyde de carbone. La mesure de ces différentes pertes de masse permet d'évaluer la part d'eau ayant réagi avec le ciment (eau non évaporable ou eau liée) et la teneur en portlandite du matériau. En prenant pour hypothèse que la quantité d'eau liée est proportionnelle au degré d'hydratation du ciment, il est possible d'évaluer alors par l'analyse thermogravimétrique le degré d'hydratation du ciment.

Lors de l'analyse thermogravimétrique, menée en parallèle de l'analyse thermique différentielle, la représentation de l'évolution du flux thermique permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés. Chaque pic endothermique ou exothermique peut être attribué à une phase hydratée. Le diagramme issu de l'analyse thermique différentielle permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés : avec la déshydratation des C-S-H (pic à 113°C), la déshydratation de l'ettringite (pic à 138°C), la déshydratation d'un aluminat de calcium ou du monosulfo-aluminat de calcium (épaulement à 178°C) et la déshydroxylation de la portlandite (pic à 472°C).

D'après [Kakali et al. \[16\]](#) les fillers calcaires présents dans le CEM II réagissent avec le ciment dès les premiers instants de l'hydratation du ciment. La transformation de l'ettringite en monosulfoaluminat est retardée, tandis que la formation de monocarbonate d'aluminat de calcium est favorisée par rapport au monosulfoaluminat, même au jeune âge. D'autre part, l'hydratation des silicates de calcium est accélérée.

Les réactions sont représentées dans les équations (1) et (2) [\[17-19\]](#)



IV.9.1 ATD/ATG sur mortiers à base de CEM II à différents âges

La figure IV.12 montre la variation de l'ATD en fonction de la température pour les mortiers à base de CEM II avec différents taux de substitution de DB. La variation de l'ATG des mortiers à base de CEM II et différents taux de substitution de DB est donnée dans la figure IV.13.

Le tableau IV.4 résume les pertes de masse lors de l'essai ATG à différentes températures et pour les trois périodes de cure humide 7 jours, 28 jours, et 180 jours.

$100 \leq T \leq 500$ °C la perte de masse correspond à l'évaporation de l'eau liée et elle nous renseigne sur l'état d'hydratation des différents liants. Par contre pour la température $400 \leq T \leq 500$ °C c'est la réaction thermique de la portlandite.

Après 7 jours de cure humide, on remarque que plus le taux de substitution de ciment en fines de déchets de brique augmente et plus l'hydratation du liant diminue car la perte de masse entre la température $100 \leq T \leq 500$ °C est plus faible dans les mortiers DB. L'hydratation des DB5, DB10 et DB15 est réduite respectivement de 7.5%, 14% et 15%.

Après 28 jours de cure humide. Le taux d'hydratation des mortiers de référence reste toujours supérieur aux autres mélanges. Les mélanges DB5, DB10 et DB15 présentent un taux d'hydratation relativement identique. Les taux d'hydratation de ces mélanges ont été réduits durant cette période d'environ 4% par rapport aux mortiers témoins. Après 180 jours de cure humide, on remarque que les taux d'hydratation de l'ensemble des mélanges incorporant les fines de déchets de brique dépassent nettement celui du mortier témoin. A cet âge, le taux d'hydratation des mortiers DB0 ont baissé par rapport aux résultats obtenus à 28 jours. Le DB5 donne les meilleurs résultats. Les taux d'hydratation ont été améliorés pour les DB5, DB10 et DB15 respectivement de 33%, 28% et 26%.

D'après les données de la littérature nous savons que les fillers calcaires influencent l'hydratation du ciment à court terme [20-22]. Plusieurs chercheurs ont montré que les fillers calcaires ont une influence physico-chimique sur la matrice cimentaire [23, 24]. Les particules de fillers calcaires qui agissent comme un site de nucléation pour les produits d'hydratation, réduisent les barrières énergétiques et permettent une précipitation plus rapide des produits d'hydratation. Les taux d'hydrations augmentent à court terme, ce qui est décrit comme un effet d'accélération [25-27]. Dans notre cas la réduction des taux d'hydratation à court terme est attribuée en grande partie au fait que le ciment utilisé contient environ 20% de filler calcaire,

et la substitution de ce ciment par les fines de brique a réduit les taux de calcaire ce qui a provoqué alors des baisses dans les taux d'hydratation à court terme.

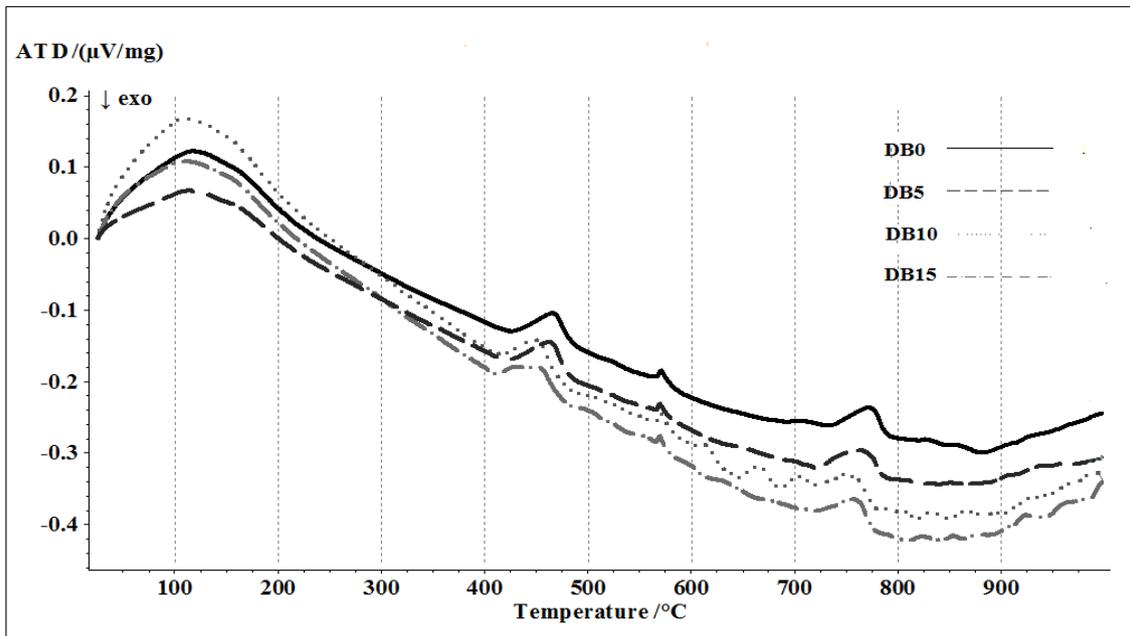


Fig IV.12 : ATD sur mortiers DB à base de CEM II.

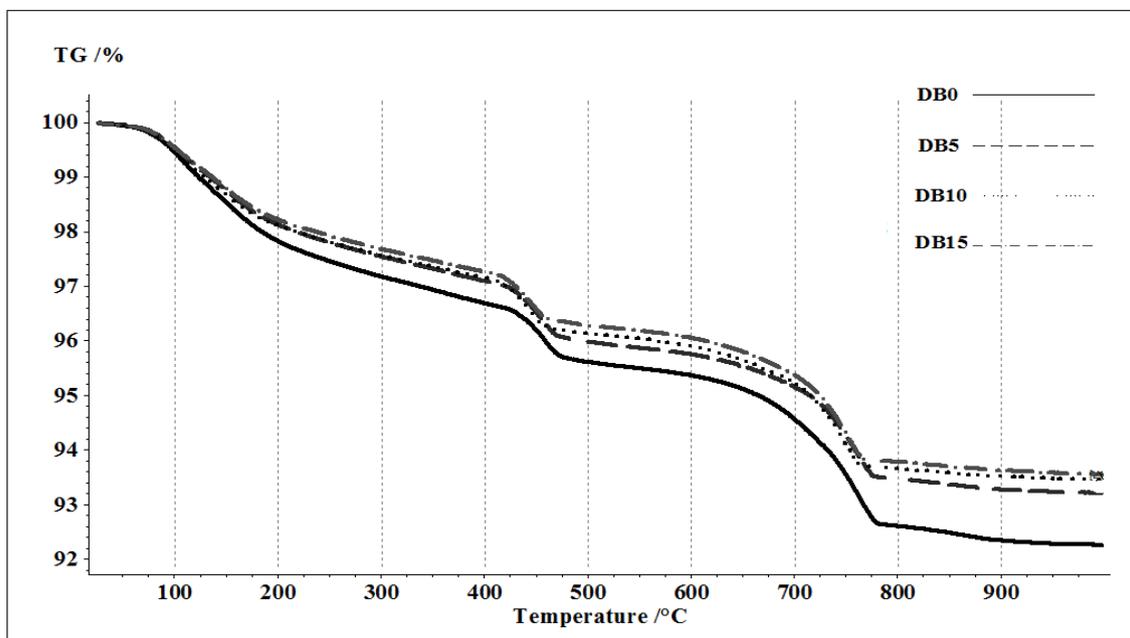


Fig IV.13 : ATG sur mortiers DB à base de CEM II.

Tableau IV.4 : ATG pour les mortiers DB à base de ciment CEM II après 7 jours, 28 jours et 180 jours de cure humide

Age	7 jours		28 jours		180 jours	
T (°C)	400-500	100-500	400-500	100-500	400-500	400-500
	Perte de masse (%)					
DB0	1.08	3.85	1.2	4.04	1.13	3.74
DB5	1.12	3.56	1.13	3.89	1.12	4.99
DB10	1.02	3.32	1.11	3.88	1.07	4.78
DB15	0.98	3.26	0.98	3.87	0.99	4.71

Au jeune âge jusqu'à 7 jours d'hydratation, les fines de brique retardent l'hydratation du mortier, à cause d'une baisse de l'activité cimentaire. Cette baisse d'activité cimentaire est attribuée d'une part à la substitution de ciment par les fines de brique et d'autre part par la réduction du taux de filler calcaire dans le CEM II. Sachant que les fillers calcaires accélèrent l'hydratation du ciment au jeune âge ; tous ces éléments conduisent à une baisse de la production de C-S-H ainsi que d'autres produits hydratés. Ces résultats confirment ainsi les hypothèses émises précédemment pour les essais de chaleur d'hydratation et de prise.

Entre 7 et 28 jours de cure humide la réduction de l'écart entre les taux d'hydratation des mortiers témoins et les mortiers incorporant les fines de brique est dû à une amélioration de l'hydratation de ces derniers.

Entre 28 et 180 jours l'amélioration de l'hydratation de tous les mélanges incorporant les fines de brique à plus de 30% est dû principalement à un effet pouzzolanique entre la silice provenant de la brique et la portlandite provenant de l'hydratation du ciment, voire aussi à l'hydratation du ciment qui est prolongé par la présence des fines de brique, ou à une combinaison de ces deux réactions. Le suivi de l'évolution du taux de portlandite en fonction de l'âge pour l'ensemble des mélanges (figure IV.16) une augmentation du taux de portlandite entre 28 et 180 jours dans les mortiers contenant les fines de brique. Etant donné que la portlandite est issue de l'hydratation du ciment, cela veut dire que la deuxième hypothèse est celle que l'on peut retenir : l'hydratation du ciment est améliorée et prolongée à long terme par la présence des fines de brique. Cette prolongation et amélioration d'hydratation à long terme, par rapport aux mortiers témoins, est attribuée aussi en grande partie, à la réaction des fillers calcaires présent dans le CEM II avec les alluminates apportés par les fines de brique, pour former des monocarboaluminates qui contribuent à la formation de plus d'hydrates [17]. Enfin la chute du

taux d'hydratation après 28 jours pour les mortiers témoins est probablement due à la carbonatation de la portlandite par la réaction suivante :



IV.9.2 ATD/ATG sur mortiers à base de CEM I

Les résultats de ATD/ATG en utilisant des mélanges à base de CEM I et DB sont donnés dans les figures IV.14 et IV.15 et les tableaux IV.5.

Il est bien connu que le C_3S s'hydrate rapidement et contribue largement au durcissement de la pâte de ciment à un âge précoce. Il assure donc les résistances initiales ($2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{CH}$) tandis que le C_2S s'hydrate lentement et sa résistance évolue à long terme ($2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + \text{CH}$). Inversement, le C_3A s'hydrate rapidement et contribue légèrement à la résistance initiale ($\text{C}_3\text{A} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{AH}_6$) ainsi que le C_4AF qui s'hydrate lentement. L'addition de sulfate de calcium permet de contrôler l'hydratation du C_3A par la formation de composés moins réactifs comme l'ettringite et les sulfoaluminates ($\text{C}_3\text{A} + 3\text{CSH}_2 + 26\text{H} \rightarrow \text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$). Lorsque l'ettringite termine sa transformation, les aluminates restants réagissent avec l'eau pour former d'autres phases (C_2AH_8 , C_4AH_{13} , C_3AH_6). Dans les ciments mélangés, les composants des matières pouzzolaniques ajoutés au clinker (silice et / ou alumine) réagissent avec le portlandite pour produire plus de phases hydratées C-S-H ou CASH ($\text{AS}_2 + 3\text{CH} + 6\text{H} \rightarrow \text{CSH} + \text{C}_2\text{ASH}_8$) [28, 29].

Après 7 jours de cure humide, plus le taux de substitution de ciment CEM I en fines de déchets de brique augmente et plus l'hydratation du liant diminue. L'hydratation des DB5, DB10 et DB15 est réduite respectivement de 2%, 5% et 8%. Après 28 jours d'hydratation, le taux d'hydratation des mortiers contenant 10 et 15% de fines de brique améliorent le taux d'hydratation par rapport au mortier témoin respectivement de 13% et 3%. Par contre, le taux d'hydratation du DB5 reste légèrement inférieur (2%) par rapport au mortier sans substitution. Après 180 jours de cure humide la tendance des taux d'hydratation reprend l'allure du jeune âge, c'est-à-dire que plus le taux de substitution de ciment CEM I en fines de déchets de brique augmente et plus l'hydratation du liant diminue. Les taux d'hydratation pour les DB5, DB10 et DB15 ont baissé par rapport aux mortiers témoins respectivement de 5%, 11% et 13%.

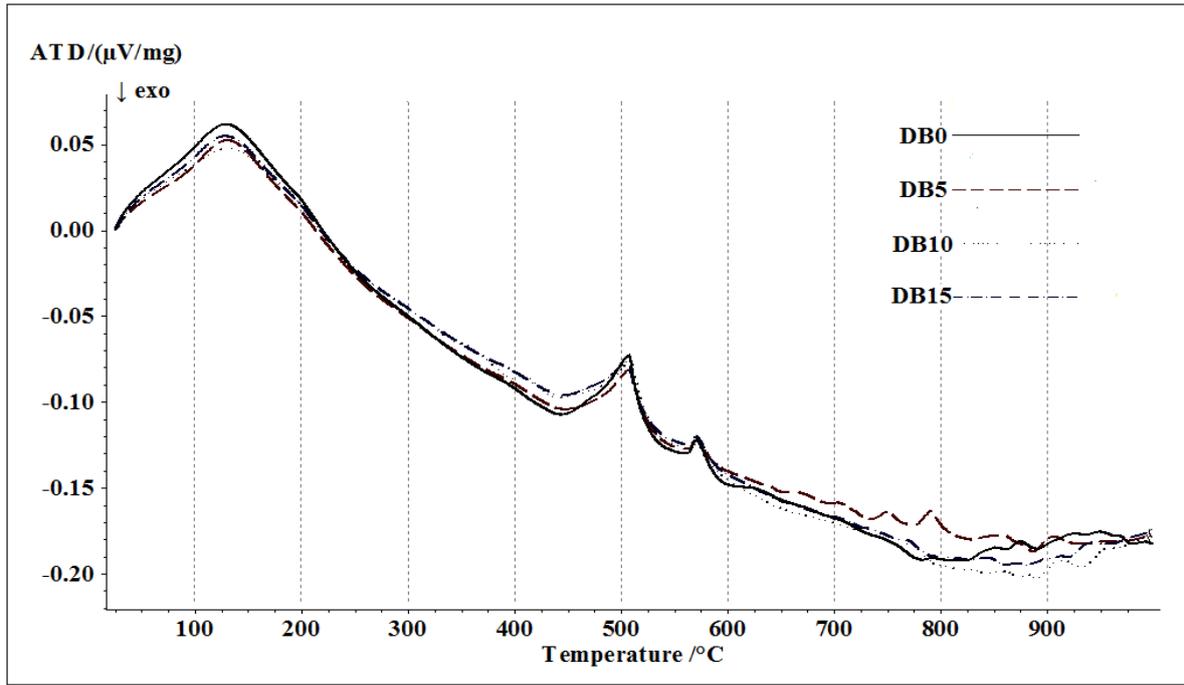


Fig IV.14 : ATD sur mortier DB à base de CEM I.

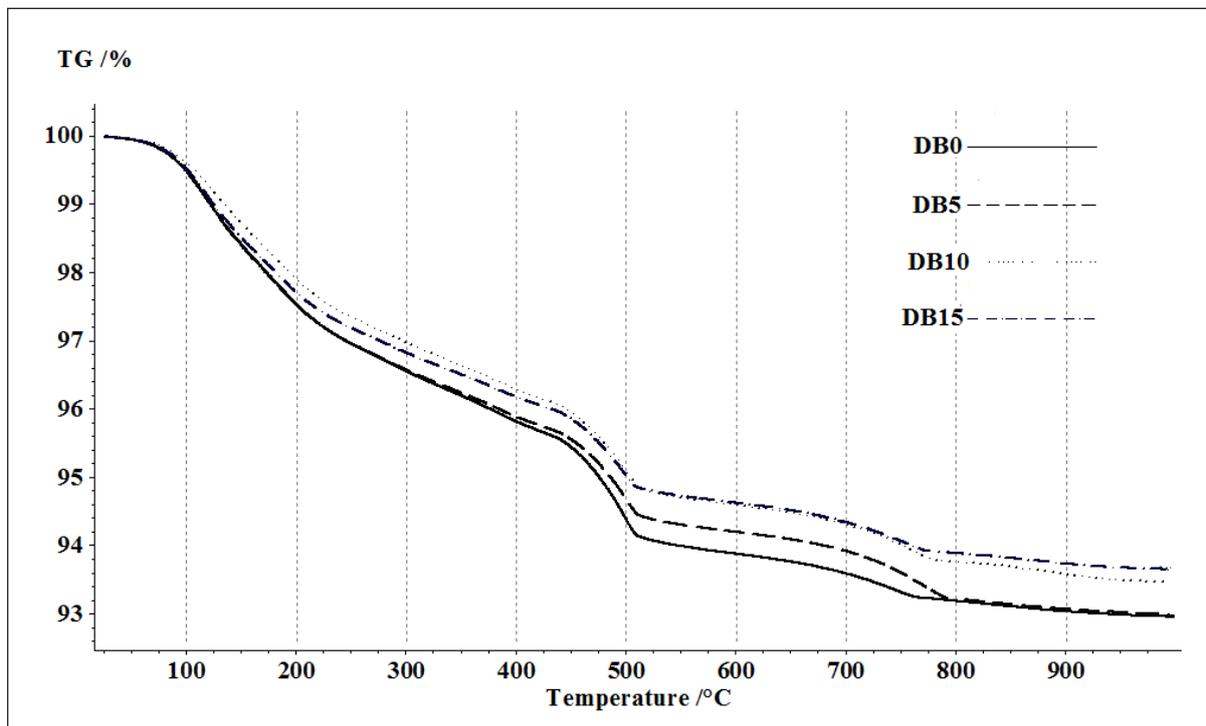


Fig IV.15 : ATD sur mortier DBT à base de CEM I.

Tableau IV.5 : ATG pour les mortiers DB à base de ciment CEM I après 7 jours, 28 jours et 180 jours de cure humide

Age	7 jours		28 jours		180 jours	
T (°C)	400-500	100-500	400-500	100-500	400-500	400-500
	Perte de masse (%)					
DB0	1.13	3.82	1.14	5.38	1.58	5.42
DB5	1.04	3.74	1.03	5.25	1.36	5.14
DB10	0.93	3.62	1.1	6.1	1.36	4.84
DB15	0.89	3.52	1.04	5.54	1.24	4.73

La comparaison de ces résultats avec l'effet des fines de brique sur le CEM II révèle que l'effet des fines de brique provoque plus de produits hydratés plutôt à court terme pour le CEM I (entre 7 et 28 jours) qu'à long terme pour le CEM II (entre 28 et 180 jours). La chaleur d'hydratation a été plus importante lors de la substitution du ciment CEM I par les fines de brique, que pour la substitution du ciment CEM II. A court terme les fines de brique ont apporté des réactions pouzzolanique dans le CEM I qui ont amélioré les produits d'hydratation dans les mélanges. Dans le ciment CEM II, ils ont apporté plus d'alumine qui a réagi avec les fillers calcaires présent dans le CEM II, pour former des monocarboaluminates [17].

IV.10 Evaluation du taux de portlandite pour les mortiers à base de CEM II

Le but de ces essais est de quantifier et d'analyser l'évolution de la portlandite, au cours du temps, issu de l'hydratation des ciments à différents taux de substitution en fines de déchets de brique. Les caractéristiques d'hydratation des ciments aux ajouts sont identifiés à l'aide des techniques ATD/ATG. Par conséquent, les pics liés à la portlandite sont situés entre 300°C et 500 °C, le pic de la silice se situe entre 570°C et 575°C, et celui de la calcite est compris entre 600 et 800°C. Au-dessous de 200°C, les pics des gels C-S-H, de l'ettringite et de l'eau contenue dans les mélanges sont superposés rendant leur distinction difficile. Les taux de portlandite sont évalués dans les différents mélanges à travers les résultats des tests ATD/ATG par la formule suivante :

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{\frac{74Dm1}{18} + \frac{74Dm2}{44}}{Me + Dm} \text{ (gramme de portlandite/gramme de ciment).....(6)}$$

Dm1 : Perte de masse de la portlandite,

Dm2 : Perte de masse de la calcite,

Me : Masse de l'échantillon,

44 : Masse molaire du CO_2 ,

18 : Masse molaire de H_2O ,

74 : Masse molaire du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Les résultats sont présentés sur la [figure IV.16](#) et le [tableau IV.6](#).

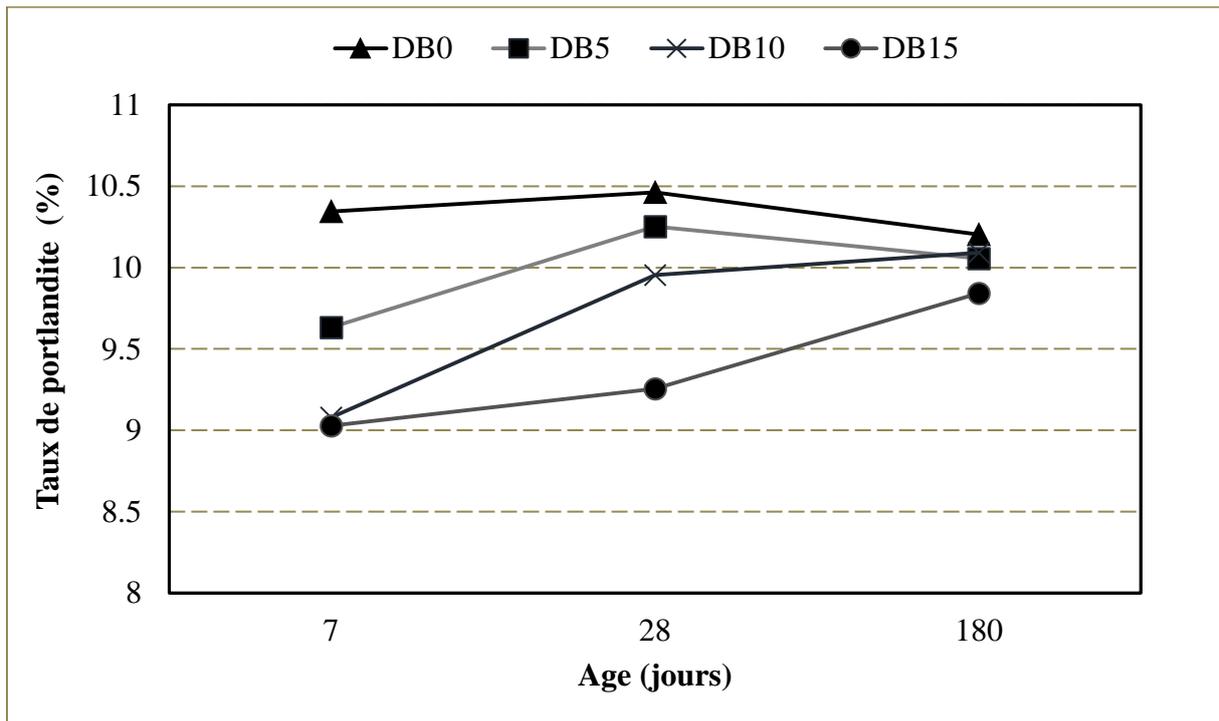


Fig IV.16 : Effet des fines de brique sur l'évolution de la portlandite en fonction de l'âge pour les mortiers à base de de ciment CEM II.

Tableau VI.6 : Taux de portlandite des mortiers DB à base de CEM II en fonction de l'âge

Mélange	Age		
	7 jours	28 jours	180 jours
DB0	10.34 %	10.46 %	10.20 %
DB5	9.63 %	10.25 %	10.05 %
DB10	9.08 %	9.95 %	10.09 %
DB15	9.03 %	9.25 %	9.84 %

Après 7 jours de cure humide, on remarque que plus le taux de substitution de ciment en fines de déchets de brique augmente et plus le taux de portlandite diminue. La portlandite dans les mélanges DB5, DB10 et DB15 est réduite respectivement de 7%, 12% et 13% par rapport aux mortiers témoins.

Après 28 jours de cure humide Le taux de portlandite des mortiers de référence reste toujours supérieur aux autres mélanges. L'écart de différence des taux de portlandite entre le DB0 et DB5 ainsi que DB0 et DB10 est nettement réduit par rapport aux résultats de 7 jours. Pour le DB15 on constate qu'il y'a une stagnation en terme de production de Ca(OH)_2 . Les taux de portlandite ont baissé durant cette période pour les mélanges DB5, DB10 et DB15 respectivement de 2%, 5%, et 11%.

Après 180 jours de cure humide, les taux de portlandite du DB15 a nettement progressé par rapport au jeune âge. Les taux de portlandite pour l'ensemble des mélanges deviennent alors comparables. On note aussi que le taux de portlandite du DB10 dépasse celui du DB5. Les taux de portlandite ont baissé par rapport au mortier de référence pour les DB5, DB10 et DB15 respectivement de 1.5%, 1% et 3.5%.

Sachant que la production de portlandite est liée directement à l'hydratation du ciment, on peut alors déduire qu'au jeune âge, jusqu'à 7 jours de cure humide, la diminution de la quantité de portlandite dans les mortiers contenant les fines de brique est due à une baisse de l'activité cimentaire. Cette baisse d'activité cimentaire est attribuée en grande partie à la substitution de ciment par les fines de brique qui a réduit la quantité de fillers calcaires et de clinker. La présence de moins de ciment dans les mélanges conduit principalement à une baisse de la production de C-S-H en parallèle et une baisse de production de Ca(OH)_2 . Les résultats à cet âge sont très proche des taux d'hydratation.

Entre 7 et 28 jours de cure humide la restriction de l'écart entre les taux d'hydratation des mortiers témoins et les mortiers incorporant les fines de brique est dû à une augmentation de production de C-S-H. L'effet des fines de brique semble retarder l'hydratation au jeune âge puis l'accélère, sauf pour le DB15 ou son retard dans la production de C-S-H perdure jusqu'à cet âge.

Entre 28 et 180 jours le retard dans la production de C-S-H se rattrape, surtout pour le DB15. Le taux de portlandite est alors presque le même pour l'ensemble des mélanges. Le DB10 produit le plus de taux de Ca(OH)_2 par rapport au DB5 et DB15, en conséquence de plus de

production de C-S-H. Une bonne proportion dans la matrice liante des fines de brique et de ciment semble favoriser la production de C-S-H à long terme. Dans notre cas la substitution de 10% de ciment CEM II par les fines de déchets de brique nous paraît être la meilleure formule pour le long terme.

Ces résultats nous amènent à énoncer que le principal effet des fines de brique sur les ciments CEM II, est la prolongation de l'hydratation jusqu'à de longues périodes. L'effet pouzzolanique est peu visible.

Aqel et Panesar [10] ont montré que la présence des fillers calcaires dans la matrice cimentaire augmente l'hydratation du ciment au jeune âge, et par conséquent la production de portlandite. Plus la finesse des fillers calcaires est élevée et plus la production de portlandite est importante.

Chikouche et al [31] Ont étudié la substitution de ciment par des argiles de barrages d'eau, préparés de différentes manières de cuisson. Ils trouvent que pour certains mélanges, la teneur en portlandite libre augmente avec le temps de murissement jusqu'à 90 jours en raison de l'hydratation de l'alite (C_3S) et de la Belite (C_2S), produisant les C-S-H et CH d'une part et la faible activité pouzzolanique des ajouts causé par un mode de calcination non adéquat.

IV.11 Evolution des taux de portlandite pour mortiers de CEM I

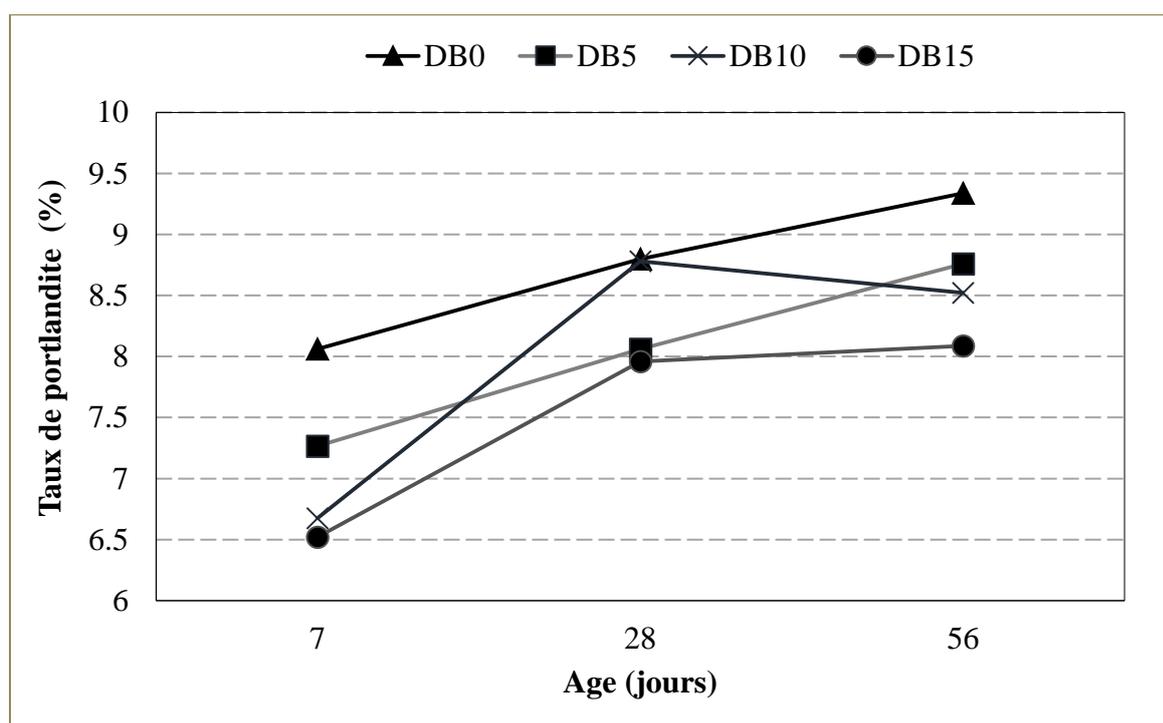
Les résultats des taux de portlandite sont présentés dans le [tableau IV.7](#) et la [figure IV.17](#).

Afin de mieux comprendre l'effet de la substitution de ciment par différents pourcentages de fines de brique sur l'évolution de l'hydratation des ciments, on refait les mêmes essais d'ATD et ATG mais cette fois en utilisant du CEM I au lieu du CEM II.

Après 7 jours de cure humide, on remarque d'après ces premiers résultats que plus le taux de substitution de ciment en fines de déchets de brique augmente et plus le taux de portlandite diminue. La portlandite dans les mélanges DB5, DB10 et DB15 est réduite respectivement de 10%, 17% et 19% par rapport au mortier témoin.

Après 28 jours d'hydratation, le taux de portlandite des mortiers de référence reste toujours supérieur aux autres mélanges. On note que le DB10 est presque identique au DB0. Les taux de portlandite sont inférieurs pour les mélanges DB5, DB10 et DB15 respectivement de 8%, 0.1%, et 9% par rapport au mortier sans substitution.

Après 180 jours de cure humide, on remarque que le taux de portlandite des mortiers de référence reste toujours supérieur aux autres mélanges. Le DB10 a son taux de portlandite diminué par rapport au jeune âge. Les taux de portlandite des mortiers témoins et des mortiers à base de fines de brique maintiennent toujours une bonne marge de différence. Les taux de portlandite pour les DB5, DB10 et DB15 sont inférieurs par rapport au mortier de référence respectivement de 6%, 9% et 13%.



FigIV.17 : Effet des fines de brique sur l'évolution de la portlandite en fonction de l'âge pour les mortiers à base de de ciment CEM I.

Tableau VI.7 : Taux de portlandite des mortiers DB à base de CEM I en fonction de l'âge

Mélange	Age		
	7jours	28 jours	180 jours
DB0	8.06 %	8.8 %	9.33 %
DB5	7.26 %	8.06 %	8.76 %
DB10	6.67 %	8.78 %	8.52 %
DB15	6.52 %	7.96 %	8.08 %

Jusqu'à 7 jours d'hydratation, on obtient la même tendance que les mortiers à base de CEM II. La baisse de la quantité de portlandite est toujours attribuée à une diminution de la quantité de ciment dans les mélanges.

Jusqu'à 28 jours d'hydratation le DB10 produit le maximum de portlandite. L'augmentation significative du taux de portlandite pour le DB15 en comparaison avec le DB0 est due à une accélération de l'hydratation durant cette période. Il a été constaté précédemment que le taux d'hydratation des DB10 et DB15 est augmenté de 13 et 3% par rapport au DB0.

A long terme la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par l'utilisation du CEM II, révèle qu'il y'a moins de portlandite dans les mortiers à base de CEM I et fines de brique que dans les mortiers à base de CEM II. Les résultats de la résistance à la compression montrent que cette baisse de portlandite en utilisant du CEM I et les fines de brique est accompagnée d'une augmentation de la résistance en compression. Le DB5 par exemple donne une résistance supérieure au DB0 à long terme. Cette baisse de portlandite ne peut être expliquée que par la réaction pouzzolanique. L'augmentation de la résistance de compression pour les DB5 et DB10 par rapport au DB0 est due à une augmentation des C-S-H. cette augmentation est causée par la consommation d'une partie de la portlandite issue de l'hydratation du ciment par la silice provenant des fines de brique et donc de formation de C-S-H supplémentaire. C'est ainsi qu'est expliquée la baisse de la quantité de portlandite. Nous considérons en fin que l'effet de la substitution du CEM II par les fines de brique provoque un allongement de l'hydratation pendant des périodes pouvant être longues. La substitution du ciment CEM I par les fines de brique accélère légèrement l'hydratation à court terme et favorise ensuite l'effet pouzzolanique selon la réaction suivante : $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} \dots \dots \dots (15).$

IV.12 Retrait total des mortiers à base de DB

Par définition, un retrait est la diminution d'une ou plusieurs dimensions d'un matériau par suite de solidification, de refroidissement, ou de transformation chimique. Le retrait peut être influencé par plusieurs paramètres, à savoir le rapport E/L, le volume de la pâte, la finesse et la nature du liant, les ajouts cimentaires et la température du milieu extérieur. Dans les matériaux cimentaires, les changements volumiques observés au cours de l'hydratation, nous amènent à définir plusieurs types de retrait.

Le retrait endogène, est lié à l'hydratation même du ciment. Ce retrait est défini par deux phénomènes : la contraction Le Chatelier, qui est une variation du volume absolue, le volume des hydrates étant inférieur au volume des produits initiaux anhydres.

La contraction de l'auto-dessiccation étant due au raffinement des pores au fur et à mesure de l'hydratation en condition isotherme. Les hydrates formés remplissent les pores et réduisent l'eau qui occupait ces vides par consommation interne, ce qui amène à des contractions d'auto-dessiccation.

Le retrait plastique est une contraction qui se produit entre le moment du gâchage jusqu'à la prise. Il est relatif à l'évaporation de l'eau à la surface du béton frais, flux d'eau ressué, ce qui conduit à une diminution de son volume, appelé retrait plastique.

Le retrait thermique, est une conséquence de la variation de la température interne du béton lors des déséquilibres calorifiques. La quantité de chaleur interne produite par l'hydratation peut être assez importante particulièrement dans les ouvrages massifs.

Le retrait de dessiccation est lié au départ de l'eau vers le milieu extérieur, appelé ainsi retrait de séchage. La cinétique de ce retrait dépend de l'évaporation de l'eau. Il est conditionné par la taille et la distribution des pores.

Le retrait de carbonatation est une conséquence de la réaction de la portlandite issue de l'hydratation du ciment avec le dioxyde de carbone de l'air, pour donner du carbonate de calcium et de l'eau selon la réaction suivante : $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \dots \dots (16)$. L'évaporation de l'eau libérée par cette réaction peut causer par les mêmes mécanismes de dépression capillaire des déformations de retrait.

Dans notre cas, les retraits des différents mortiers, sont mesurés après 24 heures de cure humide, ce qui veut dire que le retrait plastique n'est pas pris en considération. Les autres types de retrait sont mesurés simultanément par une seule mesure appelée dans notre cas retrait total.

Le retrait total des éprouvettes de mortier contenant 0%, 5%, 10% et 15 % de fines de déchets de brique sont donnés dans [la figure IV.18](#) et [le tableau IV.8](#).

Le retrait calculé dans notre cas est un retrait total. Les résultats ne peuvent s'expliquer qu'à travers les différents types de retrait vus précédemment et qui se produisent en même temps. Le retrait thermique a peu d'influence dans notre cas, les résultats de la chaleur d'hydratation montrent que les flux de chaleur dégagée sont faibles et quasiment identiques après 24 heures

pour l'ensemble des mélanges. Le retrait de carbonatation se produit sur des longues périodes, ce qui n'est pas le cas ici. Le retrait que nous avons obtenu finalement ne peut se justifier qu'à travers les retraits endogènes et d'auto-dessiccation.

L'incorporation des fines de déchets de brique, réduit le retrait des mortiers, et plus le taux de substitution de ciment en fines de brique augmente et plus le retrait diminue en particulier pour le DB15. Le comportement du DB5 est similaire à celui du mortier de référence tout au long de l'hydratation. Le DB10 produit un comportement similaire par rapport au mortier de référence jusqu'au 14^{ème} jour puis une légère réduction du retrait commence à être constatée. Le DB15 réduit plus clairement le retrait par rapport aux autres mélanges, à partir du 6^{ème} jour d'hydratation. Les DB10 et DB15 réduisent le retrait respectivement de 2% et 8.5%.

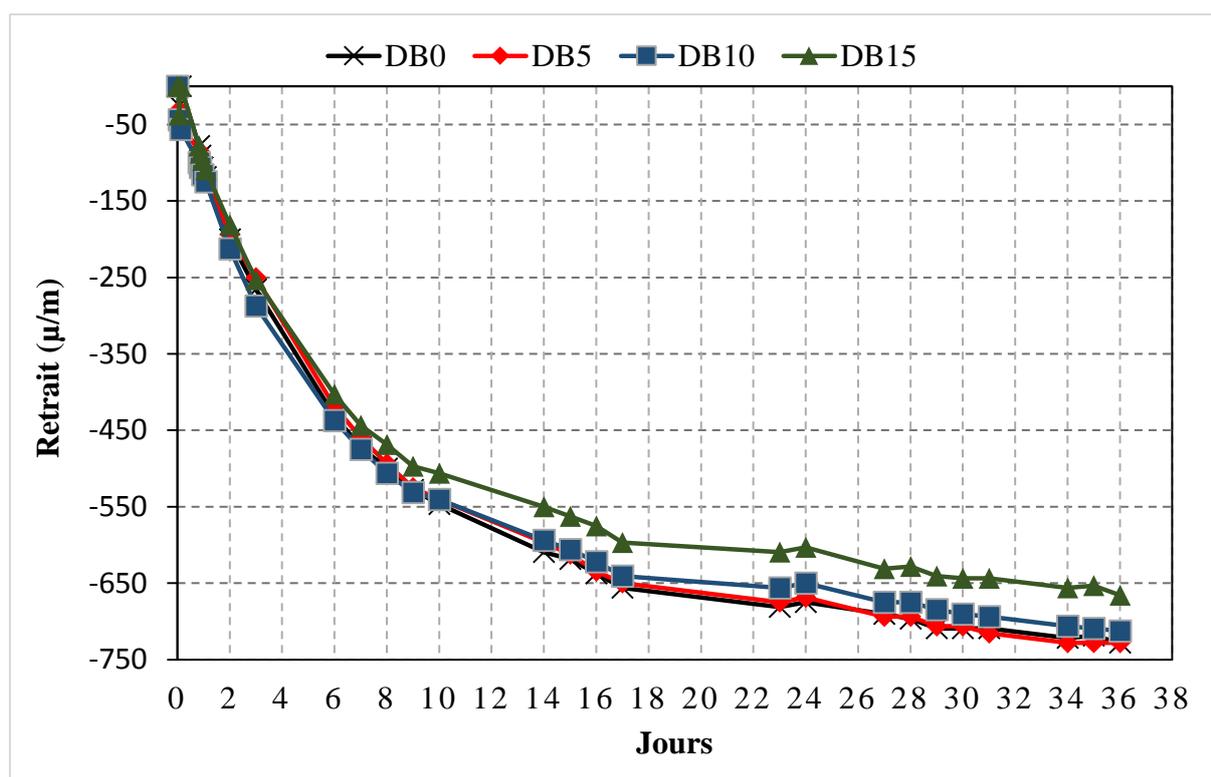


Fig IV.18 : Evolution du retrait des mortiers à base de DB.

D'après les résultats des taux d'hydratation, on remarque qu'après 7 jours de murissement, plus le taux de substitution de ciment en fines de déchet de brique augmente et plus les taux d'hydratation diminuent. La diminution du taux d'hydratation entraîne la diminution du retrait endogène.

Tableau IV.8 : Retrait des mortiers DB en fonction du temps

Retrait (um/m)				Temps(jour)
DBT5	DBT10	DBT15	DBT0	
0	0	0	0	0
-31.2	-43.8	-37.5	-25	0,06
-50	-56.25	0	0	0,125
-84.4	-100	-78.1	-78.1	0,83
-93.75	-106.3	-87.5	-90.6	0,87
-103.125	-115.6	-96.9	-106.2	0,96
-121.875	-125	-109.3	-118.7	1,08
-193.75	-212.5	-181.3	-200	2
-250	-287.5	-253.1	-265.6	3
-418.75	-437.5	-403.1	-431.2	6
-459.375	-475	-443.8	-471.8	7
-493.75	-506.3	-468.8	-500	8
-525	-531,	-496.9	-528.1	9
-540.625	-540.6	-506.3	-546.8	10
-543.75	-540.6	-496.9	-546.8	13
-596,875	-593.8	-550	-609.3	14
-612,5	-606.3	-562.5	-618.7	15
-634.375	-621,9	-575	-637.5	16
-650	-640.6	-596.9	-656,2	17
-621.875	-606.3	-559.4	-621.8	20
-646.875	-628.1	-578,1	-650	21
-662.5	-643.8	-596.9	-665.6	22
-675	-656.3	-609.4	-681,2	23
-668.75	-650	-603.1	-675	24
-693.75	-675	-631.3	-690.6	27
-693.75	-675	-628,1	-696.8	28
-706,25	-684.38	-640.6	-709.3	29
-706.25	-690.6	-643.7	-709.3	30
-715.625	-693.8	-643.7	-709.3	31
-728.125	-706.3	-656.2	-721.8	34
-728.125	-709.38	-653.1	-718.7	35
-728.125	-712.5	-665.6	-728.1	36

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, nous savons d'après les résultats de porosité ouverte, qu'après 7 jours d'hydratation, le taux de substitution de ciment en fines de brique augmente avec la porosité. Lorsque la porosité augmente, le séchage augmente et le retrait de dessiccation devient plus important en fonction de l'augmentation du taux des fines de brique. En résumé, après 7 jours d'âge l'augmentation du taux de substitution du ciment en fines de brique conduit à la réduction du retrait endogène et l'augmentation du retrait de séchage qui conduit à un retrait total plus au moins équivalent pour l'ensemble des mélanges. Après 28 jours d'âge, la réduction du retrait total pour le DB15 par rapport au mortier de référence est dû à la diminution du retrait endogène. La substitution du ciment par les fines de brique ont conduit à une diminution de la production de C-S-H par dilution, et donc une activité cimentaire ralentie, ce qui amène donc à une diminution du retrait total qui est plus évidente sur le DB15. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres chercheurs.

Bektas et al [32] trouvent que l'incorporation de 20% de fines de brique réduit le retrait tandis que le DB10 augmente le retrait par rapport au mortier de référence.

Khatib et al [33] quant à eux, concluent que plus le taux de substitution de sable par la brique augmente, plus le retrait diminue. Ceci est expliqué par la continuité de l'hydratation sur de longues périodes du fait de la présence de particules d'eau dans les pores des grains de brique. L'hydratation est retardée ainsi que le retrait.

IV.13 Influence des DB sur la résistance en compression des mortiers de CEM II

Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes de mortier normalisé à ouvrabilité constante et à différents âge : 7, 28, 56 et 180 jours. Les mélanges sont constitués de ciment CEM II, avec différents taux de substitution en fines de déchets de brique de 0%, 5%, 10% et 15%. Les résultats sont présentés dans la [figure IV.19](#) et le [tableau IV.9](#).

Les résultats de résistance en compression au jeune âge, après 7 jours de cure humide, montrent que plus le taux de substitution de ciment en fines de brique augmente et plus la résistance diminue légèrement. La réduction de la résistance pour les DB5, DB10 et DB15 comparé au mortier témoin, est respectivement de 4%,10% et 14%.

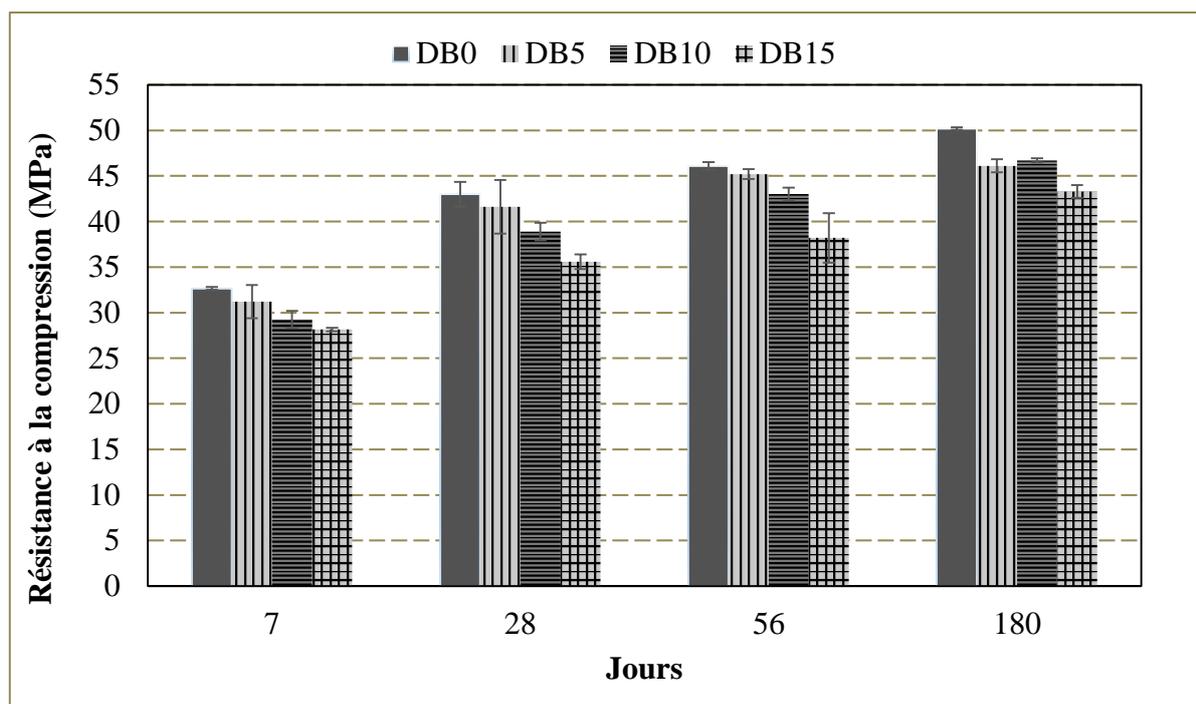


Fig IV.19 : Résistance à la compression des mortiers DB à base de ciment CEM II.

Tableau IV.9 : Résistance à la compression des mortiers à base de CEM II de 7 à 180 jours

Age	Résistance (MPa)			
	DB0	DB5	DB10	DB15
7 jours	32.7	29.8	29	28.1
	32.5	32.35	29.75	28.05
	32.8	31.5	29.05	28.3
	R_{moy} = 32.66	R_{moy} = 31.21	R_{moy} = 29.26	R_{moy} = 28.15
	$\sigma_{\text{type}} = 0.15$	$\sigma_{\text{type}} = 1.36$	$\sigma_{\text{type}} = 0.41$	$\sigma_{\text{type}} = 0.13$
28 jours	44.3	39.8	39.5	35.2
	40.9	45	38,8	36.5
	43.8	40	38.4	35.3
	R_{moy} = 43	R_{moy} = 41.6	R_{moy} = 38.9	R_{moy} = 35.6
	$\sigma_{\text{type}} = 1.83$	$\sigma_{\text{type}} = 2.94$	$\sigma_{\text{type}} = 0.55$	$\sigma_{\text{type}} = 0.72$
56 jours	45.4	45.8	42.9	38.4
	47.17	44.1	42.4	38.4
	45.75	45.8	43.8	38
	R_{moy} = 46.1	R_{moy} = 45.2	R_{moy} = 43	R_{moy} = 38.2
	$\sigma_{\text{type}} = 0.93$	$\sigma_{\text{type}} = 0.98$	$\sigma_{\text{type}} = 0.70$	$\sigma_{\text{type}} = 0.23$
180 jours	50.4	45.9	46.1	43.8
	50	47	49.7	42.5
	50.2	45.4	44.4	43.6
	R_{moy} = 50.2	R_{moy} = 46.1	R_{moy} = 46.7	R_{moy} = 43.3
	$\sigma_{\text{type}} = 0.2$	$\sigma_{\text{type}} = 0.81$	$\sigma_{\text{type}} = 2.70$	$\sigma_{\text{type}} = 0.7$

Après 28 jours de cure la même tendance constatée qu'à 7 jours d'hydratation. Les baisses de résistance pour les DB5, DB10 et DB15 sont respectivement de 3%, 10% et 17%.

Après 56 jours d'hydratation, l'ensemble des mélanges continuent à développer leurs résistances en compression. L'effet des fines de brique commence à être perçu sur le DB5 et DB10. Le DB5 atteint la résistance du mortier de référence et le DB10 atteint la même classe de résistance que le DB0. Pour le DB15 son hydratation n'est toujours pas accélérée durant cette période, car la marge de différence avec le DB0 reste toujours constante par rapport aux âges précédents. Le mortier sans substitution a une résistance qui reste légèrement supérieure par rapport au DB5, DB10 et DB15 soit respectivement de 2%, 7% et 17%.

Enfin après 180 jours de cure humide l'ensemble des mélanges atteint la classe de résistance du mortier témoin. La substitution de 10% de ciment en fines de brique semble donner les meilleures performances par rapport à 5% et 15%.

Ces résultats ne peuvent être expliqués qu'à travers les essais effectués précédemment sur la chaleur d'hydratation, le taux d'hydratation et le taux de portlandite. La résistance en compression a une relation directe avec la production de C-S-H. Il est impossible de mesurer les taux de C-S-H par l'essai ATG/ATD, car les C-S-H sont des gels qui réagissent à la même température que l'eau adsorbée ainsi que nombre d'autres minéraux entre 100 et 200°C. Par contre on peut déduire indirectement l'effet des fines de brique sur les taux de C-S-H à travers les résultats des taux de portlandite en fonction de l'âge. L'hydratation du ciment provoque la production de C-S-H qui s'accompagne toujours de la production de portlandite. L'augmentation de la portlandite induit une augmentation des taux de C-S-H par hydratation. Si on observe les résultats obtenus des taux de portlandite on constate qu'il y'a une grande corrélation entre les résistances en compression et les taux de portlandite développés en fonction des périodes d'hydratation. La réduction de la marge de différence des résistances avec les mortiers témoins à long terme, est due à l'accélération et la continuité d'hydratation des liants à base de fines de brique, vu que le taux de portlandite augmente aussi en ces périodes-là. Au jeune âge, la bonne corrélation entre les taux de portlandite et la résistance en compression montre de même que l'effet des fines de brique sur les ciments CEM II est principalement la prolongement de l'hydratation. Cela est confirmé par la baisse de la chaleur d'hydratation due à l'incorporation des fines de brique comme vu précédemment au jeune âge. La réaction des fillers calcaires présent dans le CEM II avec les aluminates présents dans les fines de brique produit des monocarboaluminates. Cela contribue à la réduction de la porosité

et donc à l'amélioration de la résistance par formation de plus de produits hydratés. Une résistance supérieure aux mortiers témoins nécessite que les proportions de filler calcaire et de fines de brique soit idéales. Ramezaniapour et Hooton [17] ont montré qu'il existe un optimum de 3% à 8% de calcaire dans un mélange contenant 10% de métakaolin ou 15% de laitier pour qu'il y ait amélioration de la résistance. Notre ciment contient environ 20% de filler calcaire, mais le manque de proportions idéales entre les fillers calcaire et les fines de brique bien qu'ayant contribué dans la production de résistance ne l'ont pas fait suffisamment par rapport au mortier témoin.

Navrátilová et Rovnaníková [34] ont utilisé plusieurs types de fines de brique comme addition cimentaire dans les mortiers de chaux. Ils montrent que la réaction pouzzolanique est étroitement liée à la teneur en phase amorphe, à la distribution granulométrique et à la surface spécifique des fines de brique. Les fines de brique contenant une surface spécifique élevée et un taux élevé de phases amorphes, augmentent les résistances en compression et favorisent les réactions pouzzolanique.

IV.14 Résistance à la compression en utilisant des mortiers de CEM I

Les résultats de la substitution du ciment CEM I par les fines de déchets de brique à différents pourcentages : 0%, 5%, 10% et 15% sont présentés dans la figure IV.20 et le tableau IV.10.

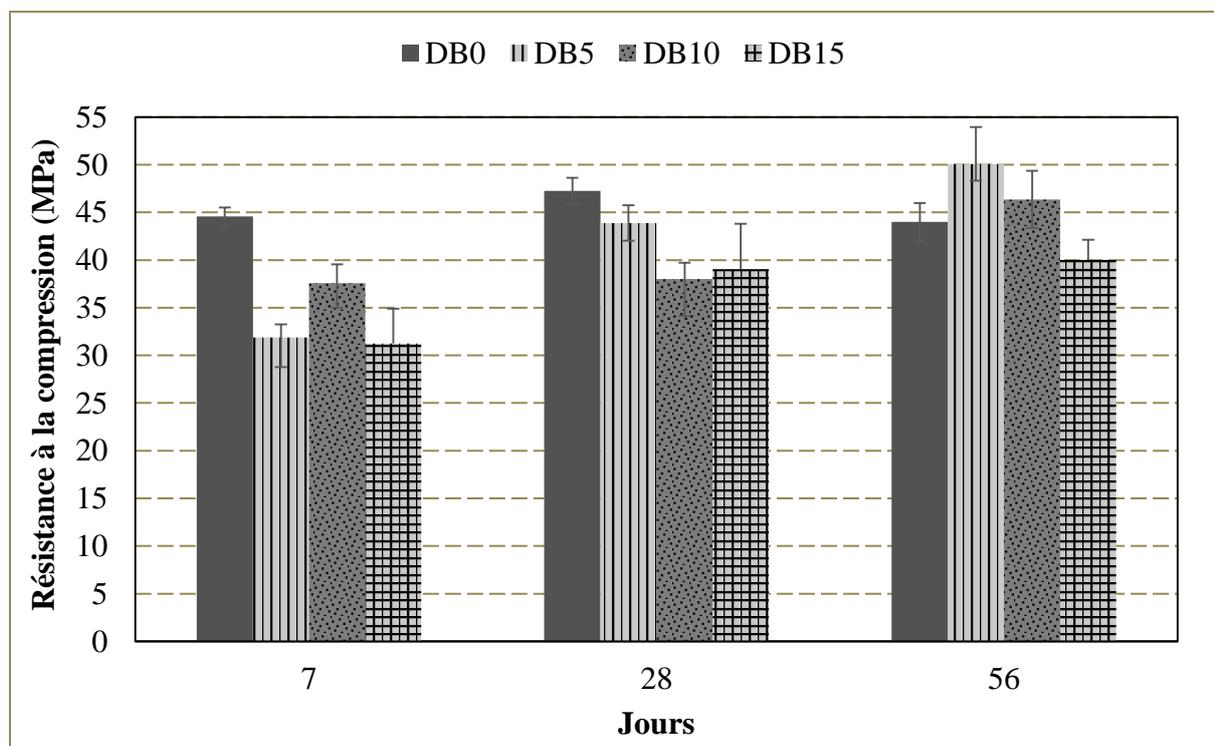


Fig IV.20 : Résistance à la compression des mortiers DB à base de ciment CEM I.

Tableau IV.10 : Résistance à la compression des mortiers à base de CEM I de 7 à 56 jours

Age	Résistance (MPa)			
	DB0	DB5	DB10	DB15
7 jours	45.25	31.89	39.01	29.82
	43.51	30.47	35.3	35.39
	44.98	33.24	38.73	28.53
	R_{moy}=44.58 $\sigma_{\text{type}} = 0.93$	R_{moy}= 31.86 $\sigma_{\text{type}} = 1.38$	R_{moy}= 37.56 $\sigma_{\text{type}} = 1.98$	R_{moy}= 31.24 $\sigma_{\text{type}} = 3.64$
28 jours	46.03	45.19	36.95	46.28
	50.78	42.57	39.06	32.27
	44.95	35.73	35.63	37.11
	R_{moy}= 47.25 $\sigma_{\text{type}} = 3.10$	R_{moy}= 43.88 $\sigma_{\text{type}} = 1.85$	R_{moy}= 38 $\sigma_{\text{type}} = 1.73$	R_{moy}= 39.05 $\sigma_{\text{type}} = 4.75$
56 jours	45.85	52.83	43.12	39.34
	45.96	51.73	49.02	42.40
	41.45	44.54	46.93	38.33
	R_{moy} = 44 $\sigma_{\text{type}} = 2.57$	R_{moy}= 50.07 $\sigma_{\text{type}} = 3.86$	R_{moy}= 46.35 $\sigma_{\text{type}} = 2.99$	R_{moy}= 40.02 $\sigma_{\text{type}} = 2.11$

Afin de mieux comprendre l'effet des fines de déchets de brique sur les résistances de compression des mortiers, il est effectué les mêmes essais en résistance à la compression en changeant le ciment CEM II par du CEM I.

Nous remarquons d'après ces résultats, qu'au jeune âge, après 7 jours de cure humide, l'incorporation des fines de brique réduit la résistance en compression des mortiers. Le comportement des mortiers semble différent par rapport à l'utilisation du CEM II. La résistance des mortiers DB10 est supérieure par rapport aux mortiers DB5 tandis que la résistance des mortiers DB15 est semblable aux mortiers DB5. Les résistances ont diminué pour les DB5, DB10 et DB15 par rapport au DB0, respectivement de 29%, 16% et 30%.

Après 28 jours de cure humide, la résistance du mortier témoin reste supérieure aux autres mélanges. La résistance des mortiers DB10 semble ne pas trop progresser. Le DB5, sa résistance devient supérieure au DB10 et DB15. Lors de l'utilisation du CEM II, La tendance au jeune âge était que le taux de substitution de ciment augmente pendant que la résistance diminue, cette tendance n'est toujours pas respectée, vu que le DB15 cette fois dépasse le DB10. Les baisses de résistance pour les DB5, DB10 et DB15 sont respectivement de 7%, 20% et 18%.

A long terme, Après 56 jours de cure humide le comportement des mortiers à base de fines de brique change complètement. Leur résistance progresse nettement. La résistance des DB5 et DB10 sont nettement supérieures par rapport au mortier sans substitution. C'est la première fois que la résistance des mortiers avec substitution dépasse les mortiers de référence. L'utilisation du MK dans les mortiers (chapitre III) n'a pas produit un résultat aussi positif. Les DB5 et DB10 augmentent la résistance par rapport aux mortiers témoins respectivement de 14% et 6%. Le DB15 a sa résistance qui baisse de 9%.

Au jeune âge, les mortiers incorporant les fines de brique, réduisent les résistances, à cause de la quantité de ciment qui est réduite dans ces derniers par rapport aux mortiers de référence. La substitution de 10% de ciment par les fines de brique a donné une résistance supérieure par rapport à la substitution de 5% de ciment. Cela démontre que les fines de brique ont déjà commencé à réagir particulièrement pour le DB10. Ces résultats confirment que les fines de brique réagissent à court terme avec les CEM I. La stagnation de la résistance du DB10 après 28 jours de cure humide montre qu'à 7 jours il y'a eu seulement une accélération de l'hydratation de ce dernier. A long terme, l'augmentation de la résistance en compression pour les DB5 et DB10 par rapport au DB0 est due à une augmentation des taux de C-S-H par l'incorporation des fines de brique dans ces mélanges. L'augmentation des C-S-H malgré la présence de moins de ciment dans les DB5 et DB10 comparé aux mortiers témoins, ne peut être expliquée que par la réaction pouzzolanique. Cette augmentation est causée par la consommation d'une partie de la portlandite issue de l'hydratation du ciment par la silice provenant des fines de brique et donc la formation de C-S-H supplémentaire. La baisse de la quantité de portlandite est ainsi expliquée durant cette période pour les mélanges incorporant les fines de brique. En fin, l'effet de la substitution du ciment CEM II par les fines de déchets de brique est un allongement de l'hydratation jusqu'à de longues périodes. La substitution du ciment CEM I par les fines de brique accélère modérément l'hydratation à court terme, et favorise ensuite l'effet pouzzolanique par la réaction suivante : $CaO+SiO_2+H_2O \rightarrow C-S-H$(17)

Debieb et Kenai [1] trouvent qu'il y'a une chute de résistance qui varie de 5 à 10% pour un taux de substitution de granulats en déchets de brique de 25%; la chute de résistance est de 30% pour une substitution totale de granulat en déchets de brique, cette diminution de résistance a été attribuée à l'existence de vieux mortier collé sur les granulats de déchets de brique.

Bektas et al [32] ont trouvé aussi que les déchets de brique ne provoquent pas de perte de résistance sur les mortiers, surtout avec le vieillissement de ces derniers ; ce qui confirme que les agrégats de brique ne provoquent pas de chute de résistance par rapport aux mortiers témoins.

Khatib [7] a utilisé des déchets de brique dans le béton et a trouvé que le taux de substitution des agrégats par la brique de 25% produit la même résistance que celle du béton de référence. Le ratio à 28 jours était seulement de 0.84 ; le gain de résistance entre 28 et 90 jours a été attribué à l'action pouzzolanique fournie par les parties très fines de la brique.

D'autres chercheurs ont appuyé également ces résultats [36-38] et peu parmi eux ont trouvé que l'incorporation de la brique dans le béton produit une augmentation de la résistance à la compression par rapport aux bétons sans addition [39].

Les figures IV.21 et IV.22 montrent des corrélations entre des courbes de formules théoriques de résistance à la compression et des courbes obtenues expérimentalement. On peut estimer par des formules théoriques, les résistances des mortiers en compression à base de ciment CEM II en fonction du temps à différents taux de substitution en fines de brique :

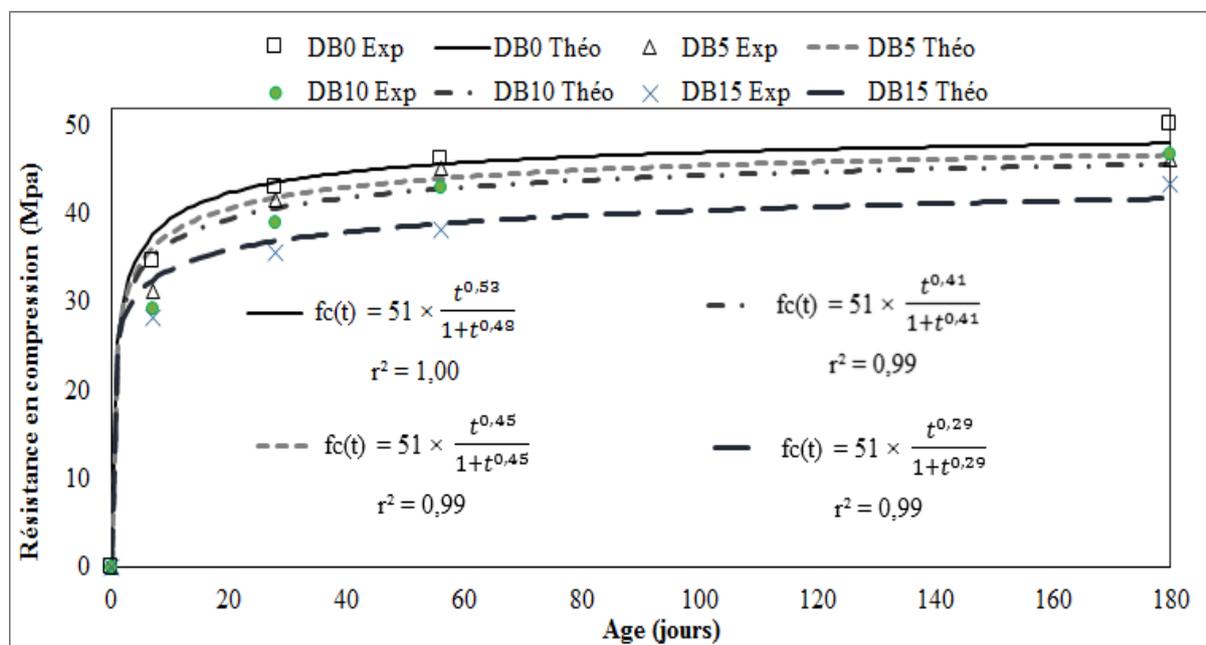


Fig IV.21 : Corrélation entre la résistance en compression expérimentale et théorique en fonction du temps pour les différents mortiers à base de CEM II et fines de brique.

N.B : - Exp : expérimentale

- Théo : théorique.

La figure IV.21 montre qu'on peut exprimer par des formules théoriques les résistances mécaniques en fonction du temps, des mortiers à base de ciment CEM II et fines de brique. La figure IV.22 montre que c'est uniquement le coefficient B de la formule théorique qui change en fonction du taux de substitution du ciment CEM II par les fines de brique. Plus le taux de substitution de ciment en fines de brique augmente et plus le coefficient diminue.

La bonne corrélation entre les formules théorique et les essais expérimentaux ne peut être expliquée que par le comportement plutôt homogène des mortiers à base de briques en fonction du temps. L'incorporation des fines de brique dans les mortiers ne provoque pas de réaction pouzzolanique en présence du CEM II mais seulement un allongement de l'hydratation en fonction du temps. La réaction pouzzolanique aurait provoqué des perturbations dans les taux de C-S-H et donc dans les résistances pour certains mélanges, c'est pour cela qu'il était impossible de faire la même corrélation en utilisant du CEM I. L'évolution de la résistance par effet pouzzolnique est imprévisible, par rapport à l'évolution de la résistance due à une prolongation de l'hydratation. La baisse du coefficient théorique en fonction de l'augmentation du taux de substitution de ciment par les fines de brique est due à une baisse de l'activité cimentaire qu'on a pu voir précédemment à travers la baisse des résistances et de la chaleur d'hydratation.

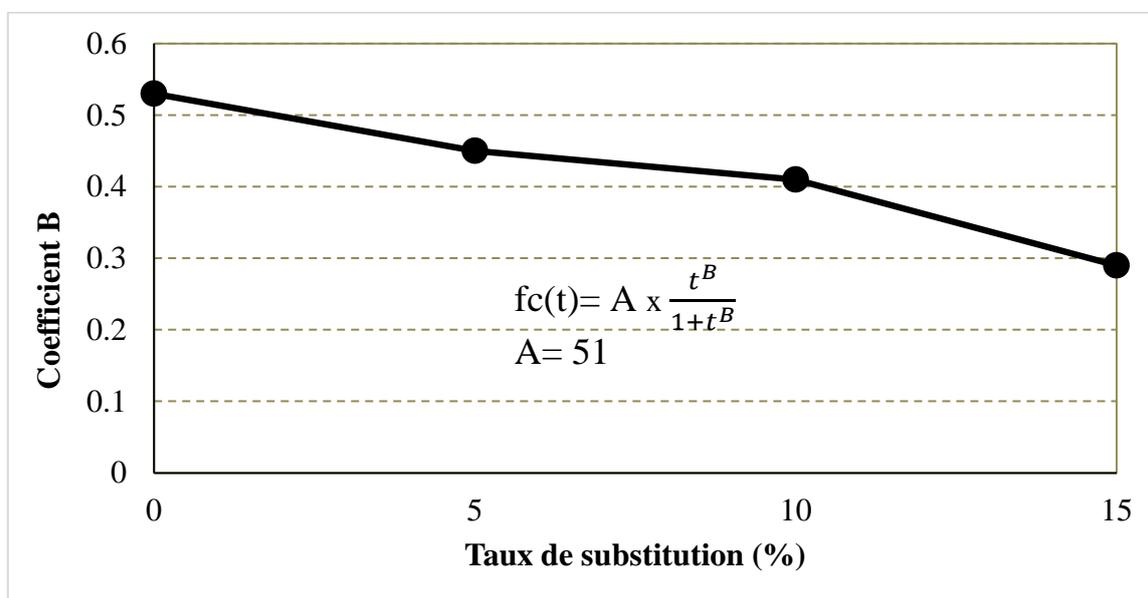


Fig IV.22 : Relation entre le coefficient B de la formule théorique et les taux de substitution de ciment CEM II en fines de déchets de brique.

VI.15 Résistance en flexion des mortiers de CEM II

Les résultats de la substitution de ciment CEM II par les fines de déchets de brique à différents pourcentages (0%, 5%, 10% et 15%) sont montrés dans la [figure IV.23](#) [tableau VI.11](#).

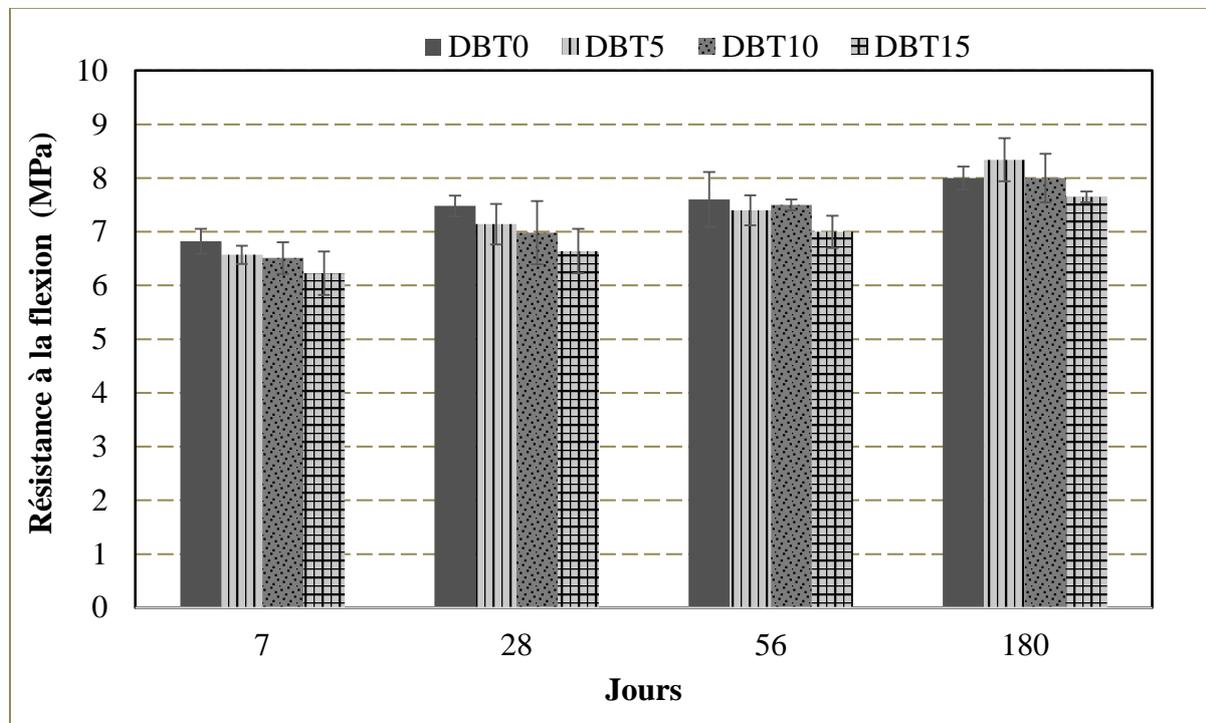


Fig IV.23 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de ciment CEM II.

Ces résultats montrent qu'au jeune âge, à 7 jours de cure humide, l'augmentation des taux de substitution du ciment en fines de brique conduit à de légères baisses de résistances à la flexion. Les DB5, DB10 et DB15 voient leurs résistances qui baissent respectivement de 4%, 5% et 9%.

La même tendance est constatée après 28 jours d'hydratation, avec des pertes de résistance pour les DB5, DB10 et DB15 par rapport au DB0 respectivement de 4.5%, 6.5% et 11%.

A long terme et après 56 jours de cure humide l'effet des fines de brique est plus visible surtout pour le DB10 qui atteint presque la résistance de flexion du mortier témoin. Les baisses de résistance pour les DB5, DB10 et DB15 sont respectivement de 2.5%, 1.5% et 8%. Après 180 jours de cure humide l'effet des fines de brique sur la flexion devient encore plus positif. La résistance à la flexion est améliorée par le DB5 à cet âge-là. Le gain de résistance est de 4%, par rapport au DB0. Le DB10 produit la même résistance que le mortier témoin, et enfin le DB15 voit sa résistance diminuer de 4%. On remarque qu'il existe une différence constante de 4% de résistance pour chaque 5% de substitution en cette période.

Tableau IV.11 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de CEM II de 7 à 180 jours

Age	Résistance (MPa)			
	DB0	DB5	DB10	DB15
7 jours	6.61	6.51	6.72	6.11
	6.79	6.76	6.63	5.9
	7.07	6.44	6.17	6.68
	R_{moy} = 6.82	R_{moy} = 6.57	R_{moy} = 6.51	R_{moy} = 6.23
	$\sigma_{\text{type}} = 0.23$	$\sigma_{\text{type}} = 0.16$	$\sigma_{\text{type}} = 0.29$	$\sigma_{\text{type}} = 0.40$
28 jours	7.57	6.7	7.31	6.34
	7.60	7.38	7.32	6.92
	7.25	7.32	6.30	
	R_{moy} = 7.48	R_{moy} = 7.14	R_{moy} = 6.98	R_{moy} = 6.64
	$\sigma_{\text{type}} = 0.19$	$\sigma_{\text{type}} = 0.37$	$\sigma_{\text{type}} = 0.58$	$\sigma_{\text{type}} = 0.41$
56 jours	7.2	7.3	7.6	7.3
	8.2	7.3	7.5	7
	7.5	7.8	7.4	6.7
	R_{moy} = 7.6	R_{moy} = 7.4	R_{moy} = 7.5	R_{moy} = 7
	$\sigma_{\text{type}} = 0.51$	$\sigma_{\text{type}} = 0.28$	$\sigma_{\text{type}} = 0.1$	$\sigma_{\text{type}} = 0.3$
180 jours	R ₁ = 6.8	R ₁ = 8.02	R ₁ = 7.9	R ₁ = 6.35
	R ₂ = 8	R ₂ = 8.5	R ₂ = 8.0	R ₂ = 7.7
	R ₃ = 8.2	R ₃ = 8.5	R ₃ = 8.1	R ₃ = 7.9
	R_{moy} = 8	R_{moy} = 8.34	R_{moy} = 8	R_{moy} = 7.65
	$\sigma_{\text{type}} = 0.21$	$\sigma_{\text{type}} = 0.4$	$\sigma_{\text{type}} = 0.45$	$\sigma_{\text{type}} = 0.1$

Dans le chapitre précédent nous avons vu, lors de l'utilisation des métakaolins, l'importance de l'effet filler sur la résistance à la flexion. La porosité dans la matrice liante ou dans l'interface patte granulat réduit et influence directement les résultats à la flexion. Cette porosité crée des phases transversales faibles, qui rompent sous l'effet de la traction par flexion.

La baisse de résistance au jeune âge par incorporation des fines de brique, est toujours due à une baisse de l'activité cimentaire causée par la réduction des fillers calcaires et le ciment. Cette baisse d'activité apparaît notamment dans la résistance à la compression et lors des essais de la chaleur d'hydratation. Cette baisse d'activité cimentaire conduit à une baisse dans la production de gel C-S-H qui conduit à des matrices liantes moins denses, donc plus poreuses, d'où la chute des résistances. Nous savons que les fillers calcaires présents dans le ciment CEM II participent à l'amélioration de la distribution des particules cimentaires. La réduction du taux de ces derniers par incorporation des fines de brique de même finesse que le liant produit donc une matrice cimentaire moins compacte. A long terme l'amélioration de la résistance à la flexion

jusqu'à 4% de plus pour les mortiers incorporant les fines de brique par rapport au mortier témoin s'explique par deux raisons :

- ✓ l'amélioration de l'hydratation,
- ✓ la présence de fines de brique non hydratées.

L'amélioration de l'hydratation à long terme pour les mortiers incorporant les fines de brique a déjà été prouvée précédemment. La réaction des fillers calcaires présents dans le CEM II avec les aluminates présents dans les fines de brique produit des monocarboaluminates. La porosité est alors réduite et la résistance à la flexion par la formation de plus de produits hydratés s'améliore. Nous avons expliqué précédemment que l'effet pouzzolanique n'a pas eu lieu à travers les résultats de portlandite et de résistance à la compression. Etant donné que la finesse des fines de brique est égale à la finesse du ciment, il est déduit que la porosité de la matrice liante a été aussi améliorée par la présence de fines de brique non hydraté qui augmente la compacité de la matrice liante. Il en résulte une augmentation de la résistance à la flexion.

En somme, c'est la continuité et l'amélioration de l'hydratation ainsi que la présence de fines de brique non hydratées dans la matrice liante qui conduisent à une augmentation de la résistance à la flexion. Cela est confirmé par la baisse de résistance d'exactement 4% pour chaque 5% de substitution de ciment en fines de brique au jeune âge. Il s'agit là d'une cause physico-chimique qui fait la différence et non une cause chimique.

Aqel et Panesar [10] ont montré que l'ajout des fillers calcaires peut améliorer la distribution granulométrique des ciments. Les fillers calcaires remplissent les vides entre les particules de ciment et donc augmente la densité et réduisent le volume des pores du système cimentaire.

IV.16 Résistance à la flexion des mortiers de CEM I

Les résultats de l'effet des fines de brique sur la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment CEM I sont présentés dans la [figure IV.24](#) et le [tableau IV.12](#).

Afin de pouvoir comparer l'effet des fines de déchets de brique sur les résistances en flexion des mortiers, nous refaisons les mêmes essais en changeant le ciment CEM II par du CEM I dans les différents mélanges vus précédemment.

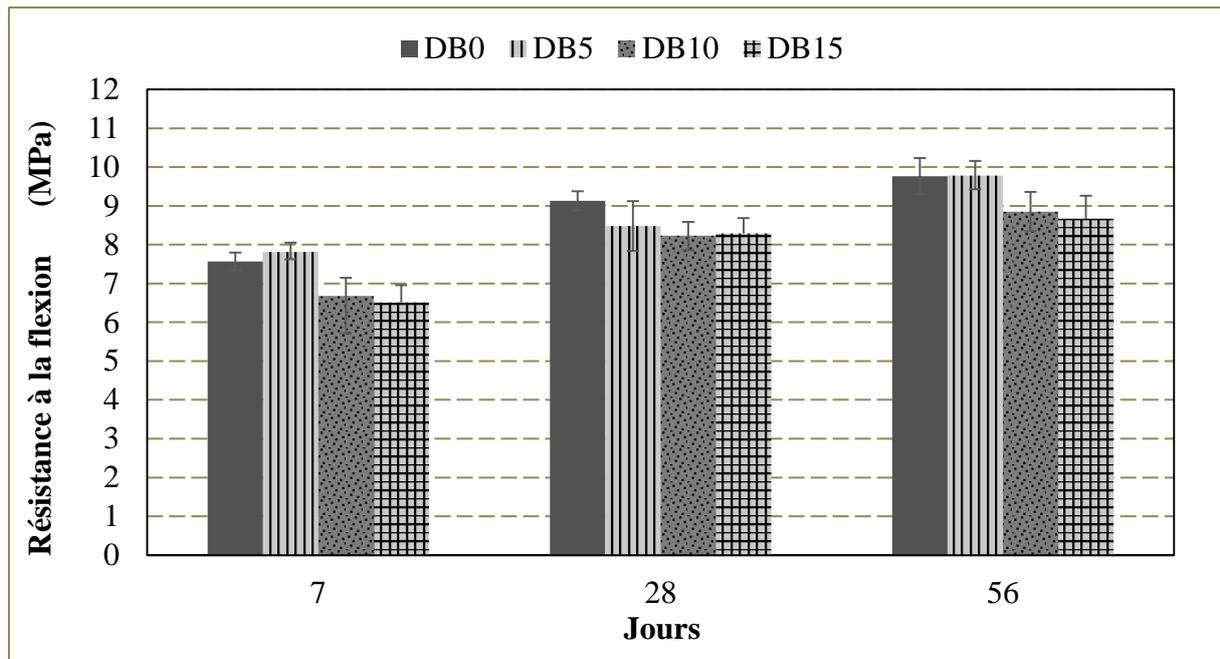


Fig IV.24 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de ciment CEM I.

Tableau IV.12 : Résistance à la flexion des mortiers DB à base de CEM I de 7 à 56 jours

Age	Résistance (MPa)			
	DB0	DB5	DB10	DB15
7 jours	7.83	7.53	6.34	6.77
	7.45	7.99	6.48	6.77
	7.42	7.91	7.21	6.0
	R_{moy}=7.56	R_{moy}= 7.81	R_{moy}= 6.67	R_{moy}= 6.51
	$\sigma_{\text{type}}=0.22$	$\sigma_{\text{type}}=0.24$	$\sigma_{\text{type}}=0.46$	$\sigma_{\text{type}}=0.44$
28jours	9.26	8.5	8.23	8.75
	9.21	9.11	8.59	8.08
	8.91	7.83	7.88	8.04
	R_{moy}= 9.12	R_{moy}= 8.48	R_{moy}= 8.23	R_{moy}= 8.29
	$\sigma_{\text{type}}=0.18$	$\sigma_{\text{type}}=0.64$	$\sigma_{\text{type}}=0.35$	$\sigma_{\text{type}}=0.39$
56 jours	9.0	9.35	8.4	8.06
	9.45	10.09	9.4	9.24
	10.84	9.89	8.76	8.71
	R_{moy}= 9.76	R_{moy}= 9.77	R_{moy}= 8.85	R_{moy}= 8.67
	$\sigma_{\text{type}}=0.95$	$\sigma_{\text{type}}=0.38$	$\sigma_{\text{type}}=0.50$	$\sigma_{\text{type}}=0.59$

Après 7 jours d'hydratation, la substitution de 5% de ciment CEM I en fines de brique, améliore la résistance par rapport au mortier témoin. Par contre pour les taux de substitution de 10% et 15% de ciment en fines de brique, leurs résistances ont baissé. Le DB5 voit sa résistance en flexion augmenter de 4%, tandis que les DB10 et DB15 ont des résistances qui baissent respectivement de 12% et 14%.

Après 28 jours de cure humide, la tendance reprend l'allure habituelle, c'est-à-dire, plus le taux de substitution de ciment en fines de brique augmente et plus la résistance en flexion diminue. Les pertes de résistance par rapport aux mortiers témoins sont de 7%, 10% et 9% respectivement pour les DB5, DB10 et DB15.

A long terme, après 56 jours d'hydratation, et comme dans le cas de l'utilisation du CEM II, le DB5 améliore la résistance de flexion par rapport au DB0. Les résistances de DB10 et DB15 baissent respectivement de 9.5% et 11% tandis que la résistance du DB5 augmente légèrement de 0.1%.

A court terme, la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus lors de l'utilisation des CEMII, révèle qu'il y'a une différence. A 7 jours d'âge le DB5 dépasse le DB0 en résistance, expliquée par l'augmentation de l'hydratation causée par l'incorporation de 5% de fines de brique. Il y a de même pour l'augmentation de la chaleur d'hydratation pour le DB5 par rapport au DB0 lors de l'utilisation des CEM I. La matrice liante plus compacte est à la base de cette amélioration de la résistance.

A long terme, la légère amélioration de la résistance à la flexion du DB5 par rapport au mortier de référence, ne peut être expliquée que par la présence de fines de brique non hydratée. Cette dernière améliore la compacité de la matrice liante et développe ainsi la résistance en général à la flexion. Nous avons vu précédemment qu'il y'a un effet pouzzolanique lors de l'utilisation du CEM I bien que la résistance à la flexion n'a été augmentée que de 0.1%. Lors de l'utilisation du CEM II la résistance a augmenté de 4% toujours pour le DB5, sans un effet pouzzolanique, mais uniquement par effet physique. Cette différence s'explique par l'effet pouzzolanique dans le cas des CEM I avec comme conséquence la consommation de la portlandite qui a laissé une porosité supplémentaire. Les phases transversales de la pâte liante sont devenues plus faibles en comparaison de l'utilisation du CEM II et des fines de brique.

IV.17 MEB sur mortier normalisé et mortier à base de déchet de brique

Les essais de microscopie électronique à balayage ont été effectués sur des mortiers à base de fines de déchets de brique et sur des mortiers témoins, en utilisant les ciments CEM II à base de filler calcaire et le CEM I. Les essais effectués après 28 jours de cure humide ont montré les résultats rapportés sur les [figures IV.25, IV.26 et IV.27](#).

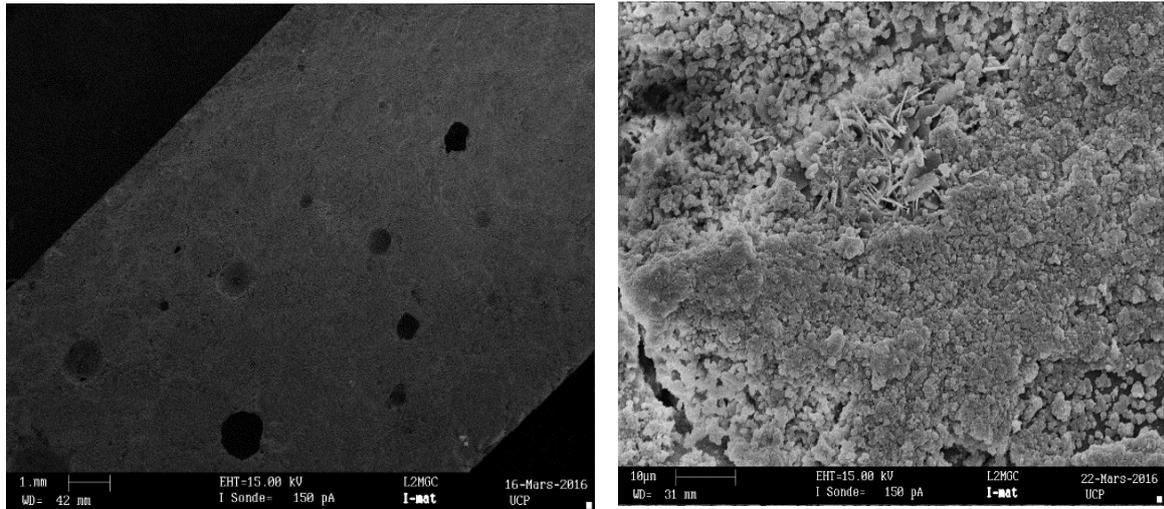


Fig IV.25 : MEB sur mortier de référence à Base de ciment CEM II.

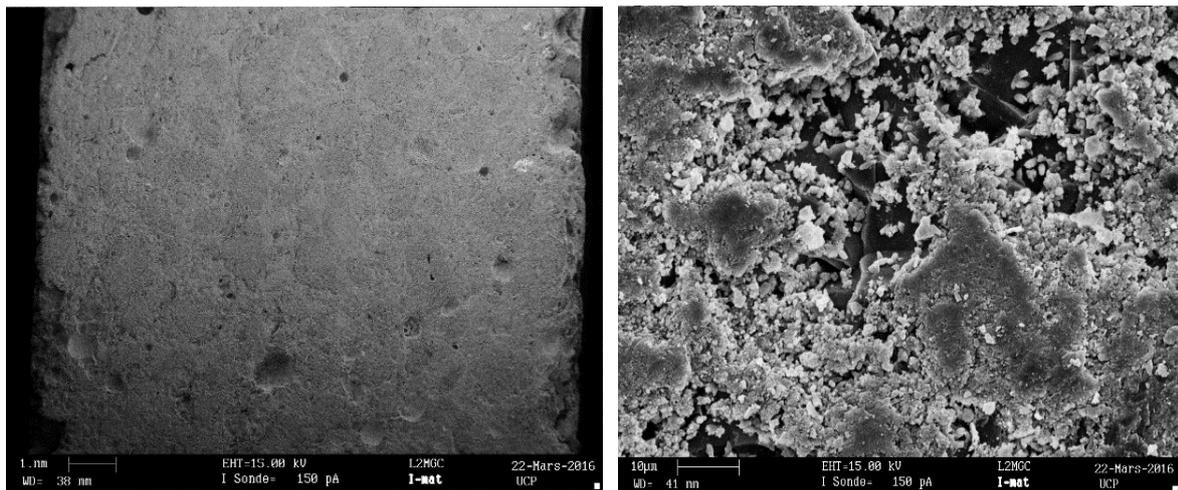


Fig IV.26 : MEB sur mortier à base de ciment CEM II et de fines de déchets de brique.

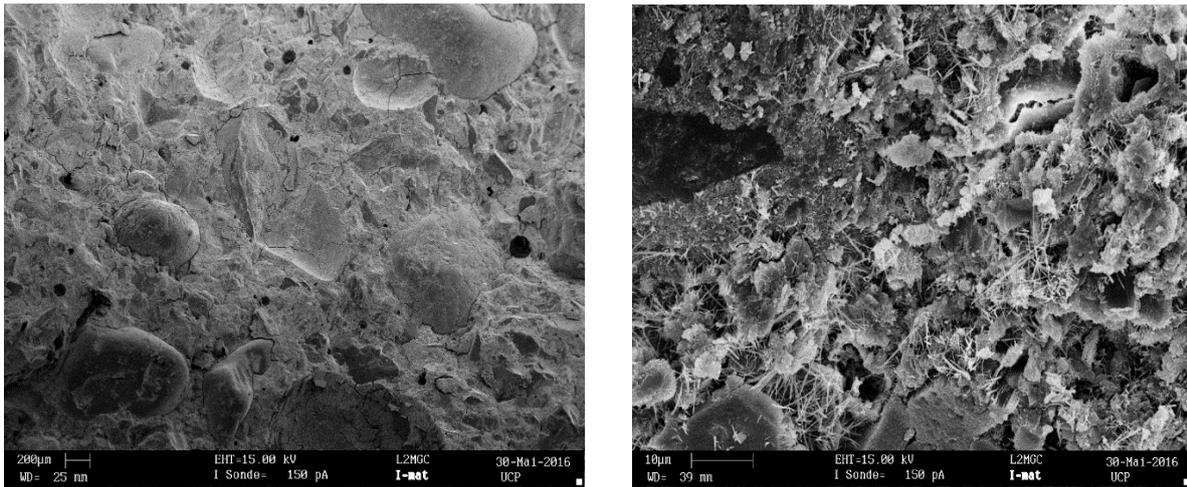


Fig IV.27: MEB sur mortier à base de ciment CEM I et de fines de déchets de brique.

L'analyse au microscope à balayage, montre que la morphologie des mortiers à base de ciment CEM II est très différente par rapport aux mortiers à base de CEM I. On constate l'apparition de nombreux petits cubes dans les mortiers à base de CEM II. Ces petits cubes représentent la calcite qui empêche de voir les hydrates (Fig VI.25 et VI.26). On remarque aussi dans les mortiers à base de ciment CEM I, qu'il y a plus d'hydrates en forme d'aiguilles représentant l'ettringite par rapport aux mortiers à base de ciment CEM II. Cependant il faut noter qu'on ne trouve pas de différences morphologiques importantes entre les mortiers à base de fines de brique et les mortiers témoins.

IV.18 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre l'effet de la substitution du ciment par les fines de brique sur le comportement des pâtes et mortiers. Nous avons montré que les résultats sur l'effet de la substitution du ciment CEM I par les fines de brique sont très différents comparés à la substitution d'un ciment CEM II. A partir de cette étude expérimentale il en ressort les conclusions suivantes :

- ✓ La substitution d'un ciment CEM II par les fines de déchets de brique, provoque de légère perte de consistance des pâtes, due au caractère adsorptif des argiles calcinées.
- ✓ L'incorporation des fines de brique dans les pâtes cimentaires, provoque des retards dans le début et la fin de prise et plus le taux de substitution de ciment par les fines de déchet de brique augmente et plus ce retard devient important.

- ✓ La substitution de ciment à base de filler calcaire jusqu'à 15% par les fines de brique, provoque de très légères pertes d'ouvrabilité. Ces pertes de maniabilité peuvent être négligeables, et l'ajout d'un superplastifiant peut être évité.
- ✓ L'augmentation du taux de substitution du ciment CEM II par les fines de brique, provoque la réduction de la chaleur d'hydratation et des retards dans l'apparition des pics de flux de chaleur. Dans le cas de l'utilisation du CEM I, le DB5 augmente la chaleur d'hydratation par rapport au mortier témoin, tandis que le DB10 et DB15 la réduisent. L'apparition des pics de flux de chaleur coïncide pour l'ensemble des mélanges dans ce cas.
- ✓ L'incorporation des fines de brique dans un ciment à base de filler calcaire semble retarder l'hydratation. Les taux d'hydratation sont réduits au jeune âge et augmentent nettement à long terme par rapport aux mortiers témoins. Par contre pour le CEM I, l'amélioration du taux d'hydratation se produit uniquement entre 7 et 28 jours, tandis qu'à long terme, le mortier de référence présente le taux d'hydratation le plus élevé.
- ✓ La production de portlandite est réduite au jeune âge pour les mélanges incorporant du ciment CEM II et la fine de déchet de brique, mais à long terme leurs taux de portlandite augmentent surtout pour le DB10. Dans le cas des mélanges incorporant du CEM I et la fine de brique, le taux de portlandite baisse nettement à partir de 28 jours. Entre 7 et 28 jours d'hydratation, le DB10 produit le plus de portlandite par rapport aux autres mélanges.
- ✓ Les résistances mécaniques en compression diminuent par la substitution du ciment CEM II par la fine de brique au jeune âge. A long terme les résistances sont nettement améliorées et atteignent les mêmes classes de résistance que les mortiers témoins. Le DB10 donne les meilleurs résultats. Pour ce qui est des mortiers à base de ciment CEM I, l'incorporation de la fine de brique baisse la résistance à court terme, tandis qu'à long terme les mortiers à base de 5% et 10% de fines de brique améliorent la résistance à la compression jusqu'à environ 15% par rapport aux mortiers témoins. Le DB5 donne les meilleurs résultats.
- ✓ La résistance à la flexion des mortiers à base de fine de brique et de ciment CEM II, est légèrement inférieure par rapport au mortier témoin à court terme. A long terme, la résistance s'améliore et le DB5 donne des résistances supérieures aux mortiers témoins

tandis que le DB10 présente une résistance égale à celle du mortier de référence. Pour les mortiers à base de CEM I, le DB5 donne aussi les meilleurs résultats avec des résistances comparables à celles du mortier témoin à court et long terme. Pour les autres mélanges leurs résistances restent inférieures par rapport à celle des mortiers sans ajout.

- ✓ L'incorporation des fines de brique dans les mortiers à base de ciment CEM II réduit le retrait pour des taux de substitution de ciment supérieur ou égale à 10%. Le DB5 produit le même comportement que celui du mortier témoin.
- ✓ La morphologie des mortiers à base de CEM II et CEM I et des fines de brique est très différente. L'apparition de la calcite est prédominante dans les mortiers à base de CEM II.

Références bibliographique

- [1] Debieb F. and Kenai S., "The use of coarse and fine crushed brick as aggregate in concrete", *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, N° 5, pp. 886–93.
- [2] Brooks J.J., Johari M.A.M., Mazloom M., "Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2000, Vol. 22, N° 1, pp. 293–301.
- [3] Bentz D.P., "Powder additions to mitigate retardation in high volume fly ash mixtures", *ACI Materials Journal*, 2010, Vol. 107, N° 5, pp. 508–14.
- [4] Bentz D.P. and Ferraris C.F., "Rheology and setting of high volume fly ash mixtures", *Cement and Concrete Composites*, 2010, Vol. 32, N°4, pp. 265–70.
- [5] Bentz D.P., Ferraris C.F., De la Varga I., Peltz M.A., "Winpighler J. Mixture proportioning options for improving high volume fly ash concretes", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2010, Vol. 3, N° 5, pp. 234–40.
- [6] Bentz D.P., Sato T., Igor de la Varga, Jason W., "Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures", *Cement and Concrete Composites*, 2012, Vol. 34, pp.11–17.
- [7] Bektas F., Wang K., Ceylan H., "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability", *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp. 1909–1914.
- [8] Sato T. and Beaudoin J., "Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials", *Advances in Cement Research*, 2011, Vol. 23, N°1, pp.1–11.
- [9] De Weerd K., Kjellsen K., Sellevold E., Justnes H., "Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements", *Cement and Concrete Composites*, 2011, Vol. 33, N° 1, pp. 30–8.
- [10] Aqel M. and Panesar D.K., "Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler", *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 113, pp 359–368.

- [11] Mostafa N.Y., El-Hemaly S.A.S., El-Wakeel E.I., EL-Korashy S.A., Brown P.W., “Characterization and evolution of the pozzolanic activity of Egyptian industrial by-products. Silica fume and dealuminated kaolin”, *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, pp.467–474.
- [12] Mostafa N.Y. and Brown P.W., “Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: isothermal conduction calorimetry, *Thermochim*”, *Acta* 435, 2005, pp. 162–167.
- [13] Said-Mansour M., Kadri E., Kenai S., Ghrici M., Bennaceur R., “Influence of calcined kaolin on mortar properties”, *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 25, pp. 2275–2282.
- [14] Ambroise J., Maximilien S., Pera J., “Properties of metakaolin blended cements”, *Advanced Cement Based Materials*, 1994, Vol. 1, N° 4, pp. 161–168.
- [15] Frías M., de Rojas M.I.S., Cabrera J., “The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars”, *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, N° 2, pp. 209–216.
- [16] Kakali G., Tsivilis S., Aggeli E., Bati M., “Hydration products of C₃A, C₃S and Portland cement in the presence of CaCO₃”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, N° 7, 2000, pp.1073–1077.
- [17] Ramezani pour A.M. and Hooton R. D., “A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland limestone cement mixes containing SCMs”, *Cement and Concrete Composites*, 2014, Vol. 51, pp. 1–13.
- [18] Bentz D., “Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D”, *Cement and Concrete Composites*, 2006, Vol. 28, N° 2, pp. 124–129.
- [19] Kuzel H. and Baier H., “Hydration of calcium aluminate cements in the presence of calcium carbonate”, *European Journal of Mineralogy*, 1996, Vol. 8, pp. 129–141.
- [20] Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Tsivilis S., “Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements”, *Cement and Concrete Composites*, 2005, Vol. 27, V° 2, pp. 191–196.
- [21] Tennis P., Thomas M., Weiss W., “State-of-the-art report on use of limestone in Cements at levels of 15%”, *Portland Cement Association*, 2011, SN3148.
- [22] Zhu W. and Gibbs J.C., “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, N° 8, pp. 1457–1462.
- [23] Bonavetti V., Donza H., Mene´ndez G., Cabrera O., Irassar E., “Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy”, *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol. 33, N° 6, pp. 865–871.
- [24] Guemmadi Z., Houari H., Resheidat M., Toumi B., “A better use of limestone filler in concrete”, in: *The International Conference on Construction and Building Technology 2008 (ICCBT 2008)*, Kuala Lumpur, Malaysia, June 16–20, 2008, pp. 307–318.
- [25] Vuk T., Tinta V., Gabrovec R., Kaucic V., “The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31 N° 1, pp.135–139.

- [26] Craeye B., De Schutter G., Desmet B., Vantomme J., Heirman G., Vandewalle L., Kadri E., “Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2010, Vol. 40, N° 6, pp. 908–913.
- [27] Lin F. and Meyer C., “Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure”, *Cement and Concrete Research*, 2009, Vol. N° 39, 4, pp. 255–265.
- [28] Fernandez Lopez R., “Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries”, (Ph.D Thesis), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 2009. p. 53.
- [29] Tironi A., Trezza M.A., Scian A.N., Irassar E.F., “Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays”, *Cement and Concrete Composites*, 2013, Vol. 37, pp. 319–327.
- [31] Chikouche M.A, Ghorbel E., Bibi M., “The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement”, *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 106, pp.330–341.
- [32] Bektas F., Wang K., Ceylan H., “Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability,” *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp. 1909–1914.
- [33] Khatib J.M., “Properties of incorporating fine recycled aggregate,” *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, N° 4, pp. 763–9.
- [34] Navrátilová E. and Rovnaníková P., “Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars”, *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 120, pp. 530–539.
- [35] Khatib J.M., “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate” , *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, N° 4, pp. 763–9.
- [36] Devenny A. and Khalaf F.M., “The use of crashed brick as coarse aggregate in concrete”, *Masonry International*, 1999, Vol. 12, pp. 81–4.
- [37] Desmyter J., Van Dessel J., Blockmans S., “The use of recycled concrete and masonry aggregates in concrete: Improving the quality and purity of aggregates. In: Proceedings of the international conferenc, Dundee University, 1999, pp. 139–49.
- [38] Kibriya T. and Speare P.R.S., “The use of crushed brick coarse aggregate in concrete”, In: *Proceedings of the international conference, Dundee University; 1996, pp. 495–503.*
- [39] Akhtaruzzamana A. and Hasnat A., “Properties of concrete using crushed brick as aggregate”, *Concrete International*, 1983, Vol. 2, pp. 58–63.

Conclusions Générales et Perspectives

Conclusions générales et perspectives

Notre étude expérimentale a été élaborée pour analyser l'effet du métakaolin et des fines de brique sur les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité des mortiers et bétons. Les pourcentages de métakaolin utilisés sont : 0%, 10%, 15%, 20% et 30% pour les mortiers et de 0%, 10% et 15% pour les bétons. Les taux de substitution du ciment par les fines de déchets de brique sont : 0%, 5%, 10% et 15%. Les résultats obtenus lors de cette étude, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Le métakaolin réduit la résistance mécanique au jeune âge entre 1 et 7 jours. L'impact du métakaolin sur le développement de la résistance des mortiers à la compression se produit surtout entre 7 et 28 jours, mais à long terme son effet est négligeable.
- ✓ L'incorporation du métakaolin joue un rôle très positif dans l'amélioration de la résistance à la traction par flexion des mortiers. Le taux de substitution de 10% donne les meilleurs résultats à court terme et le taux de 20% donne les meilleurs résultats à long terme (90 et 180 jours).
- ✓ Le rôle du métakaolin sur la résistance à la compression est beaucoup plus significatif sur les bétons que sur les mortiers. Pour le béton, la résistance est nettement améliorée à partir de 28 jours par rapport au béton de référence.
- ✓ A court terme, le taux de substitution de 15% en MK donne la meilleure résistance à la compression. Par contre, à long terme c'est le taux de 10% qui semble produire la meilleure résistance à la compression.
- ✓ L'influence du métakaolin sur la cinétique d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité) demeure très positif quelque soit le taux de substitution. Cependant le taux de 15% de MK donne la plus faible sorptivité ($1,23 \text{ cm. s}^{1/2}$) par rapport à ($1,83 \text{ cm. s}^{1/2}$) pour le béton de référence.
- ✓ La présence du métakaolin dans le béton a réduit la perméabilité à l'eau jusqu'à 25% en comparaison avec le béton contrôle.
- ✓ L'influence du métakaolin sur la perméabilité au gaz est moins efficace. L'incorporation du métakaolin a augmenté le coefficient de perméabilité au gaz.

L'incorporation des fines de brique dans une matrice cimentaire à base de filler calcaire produit des ciments avec des classes de résistance comparables avec les ciments au métakaolin, cependant les comportements sont différents à court et à long terme.

- ✓ L'incorporation des fines de déchets de brique, provoque de légères pertes de consistance des pâtes, et des retards dans les prises du ciment.
- ✓ La substitution du ciment à base de filler calcaire jusqu'à 15% par les fines de brique provoque de légères pertes d'ouvrabilité.
- ✓ Les fines de brique, provoquent la réduction de la chaleur d'hydratation et des retards dans l'apparition des pics de flux de chaleur.
- ✓ Les taux d'hydratations sont réduits au jeune âge mais augmentent nettement à long terme pour les mélanges à base de fines de brique par rapport aux mortiers témoins.
- ✓ La production de portlandite est réduite au jeune âge pour les mélanges incorporant la fines de brique, mais à long terme leurs taux de portlandite augmentent et en particulier pour le DB10.
- ✓ Les résistances mécaniques diminuent avec l'incorporation des fines de brique au jeune âge. A long terme elles sont nettement améliorées.
- ✓ Les résistances à la flexion sont légèrement réduites au jeune age pour les mélanges à base de fines de brique. Elles sont améliorées à long terme.

Perspectives

L'étude expérimentale réalisée reste limitée. Elle mérite d'être poursuivie par d'autres travaux de recherche que l'on pourrait formaliser ainsi :

- Effet de la conservation des mortiers contenant le métakaolin local dans différents environnements de cure simulant les environnements des différentes régions de notre pays (climat chaud et sec, ...) de même que l'effet de la durée de cure ;
- Effet du type et de la durée de cure sur les propriétés des mortiers et bétons contenant le métakaolin local ;
- Etude de la faisabilité économique de l'utilisation des ciments à base de métakaolin dans les cimenteries algériennes ;

- Etude rhéologique des mortiers et bétons auto-plaçants à base de fines de brique recyclées ;
- Etude de la durabilité des mortiers et bétons à base de fines de brique recyclées.

Annexes

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

Super plastifiant
Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

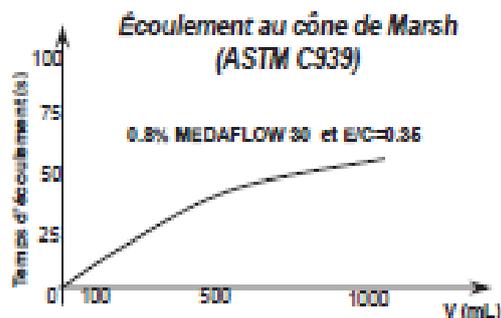
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçants
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenue pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 0,1$ g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.





Société Nouvelle du Littoral

**SABLE NORMALISE GEN CERTIFIE
CONFORME EN 196-1**

**SABLE NORMALISE ISO
CONFORME ISO 679**

**Méthodes d'essais des ciments
Sable pour mesure des résistances mécaniques**

1- CARACTERISTIQUES

Le sable normalisé GEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1\,350 \pm 5$ g.

Les livraisons se font à l'unité carton de 20 sachets pesant 27.5 kg et sur palette de 2 à 45 cartons, protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

2- CONTROLES

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5).

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11).

3- CONFORMITE

La conformité à la norme est contrôlée par le L.E.M.V.P. (Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS

Le certificat de conformité à la norme Européenne est délivré par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé - 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.

