UNIVERSITÉ YAHIA FARES - MÉDÉA
Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Matériaux et Environnement

DOCTORAT en 3ème cycle (LMD)
Spécialité Génie Civil

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS D'UN MORTIER AVEC DU VERRE ET DE LA BRIQUE CUITE COMME SUBSTITUANTS AU CIMENT

Par
Bouleghebar Yasmina

Devant le jury composé de :

Dr. Safiddine Salim	U. de Médéa	Président
Pr. Benabed Benchaa	U. de Laghouat	Examinateur
Dr. Boukhelkal Djamila	U. de Médéa	Examinatrice
Pr. Bentchikou Mohamed	U. de Médéa	Directeur de thèse
Pr. Boukendakdji Otmane	U. de Médéa	Co-Directeur de thèse
Pr. Kadri El Hadj	U. de Cergy Pontoise	Invité

Médéa, 2024

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche s'est déroulé au sein de Laboratoire de Génie Civil de l'Université de Yahia Fares Médéa.

Je tiens, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre dieu ALLAH qui m'a donné de la volonté, du courage et surtout de la patience, pour effectuer le présent travail.

Je remercie mon directeur de thèse, Monsieur Bentchikou Mohamed, professeur à l'Université de Médéa, pour avoir été encadrant de ces travaux. Je tiens à lui remercier pour m'avoir guidé, conseillé, encouragé, pour m'avoir appris à faire de la recherche et pour sa grande disponibilité, et ses conseils précieux qui m'ont permis de terminer ce travail de recherche. Je le remercie pour le temps qu'il a consacré pour la préparation de cette thèse.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à mon co-directeur de thèse, le Professeur Boukendakdji Otmane de l'université de Médéa, pour sa gentillesse, ses conseils scientifiques, ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.

Je souhaite également remercier Monsieur El-Hadj Kadri, Professeur à l'Université de Cergy-Pontoise, France, pour son soutien précieux dans la réalisation de cette recherche.

Je voudrais exprimer ma gratitude envers tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail :

Je tiens à remercier les responsables du laboratoire de Génie civil, de l'Université de Médéa, pour leur soutien scientifique et d'avoir mis à ma disposition les matériaux et appareillages nécessaires.

Je voudrais exprimer ma gratitude à ma famille. A ma mère qui m'a soutenue moralement et émotionnellement jusqu'ici. A mon merveilleux père décédé qui n'a pas pu voir mon travail, Comme j'aurais souhaité que tu sois à mes côtés dans ce beau moment de ma vie. Aux autres membres de ma famille, à mes amis, à mes collègues, pour leur soutien indéfectible.

Bouleghebar Yasmina

RÉSUMÉ

Le béton autoplaçant (BAP) représente une véritable révolution technique dans le domaine de la construction et du génie civil. Leur grande fluidité et stabilité nécessite un volume de pâte élevé, ce qui conduit souvent à une forte consommation de ciment. Cela peut entrainer une augmentation du coût du BAP ainsi que des émissions de CO_2 dans l'environnement. La valorisation des déchets de verre et de la brique cuite dans les matériaux cimentaires en remplacement du ciment pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante.

Le présent travail est une contribution à la valorisation des déchets de verre et de la brique cuite en tant que matériaux cimentaires alternatifs dans la composition des mortiers autoplaçants (MAP). L'influence de la teneur ainsi que l'effet de la surface spécifique des ajouts cimentaires utilisée ont fait l'objet de cette étude. Le ciment est partiellement substitué par 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de la poudre de verre (PV) et par 4%, 8%, 12%,16% et 20% de la poudre de brique (PB), séparément. Ces poudres sont broyées à trois finesses différentes : 3300 cm^2/g, 4400 cm^2/g et 6000 cm^2/g. Après avoir déterminé l'optimum de chaque composite binaire (Ciment+PV et Ciment+PB), l'effet combiné de ces ajouts cimentaires en composite ternaire (80% Ciment+12% PV+8% PB) est ensuite étudié.

Les résultats expérimentaux montrent que la substitution du ciment par de la PV améliore l'ouvrabilité des MAP quelque soit sa surface spécifique. En revanche, la PB entraine une réduction de l'ouvrabilité des MAP. Cet effet étant plus significatif avec des finesses élevées. À l'état durci, il est constaté une amélioration des propriétés mécaniques à long terme avec l'augmentation de la surface spécifique et du taux de substitution du ciment par la PV et PB. Par ailleurs, l'incorporation du PV réduit la porosité et l'absorption d'eau par immersion des MAP, tout en diminuant le retrait. Cependant, pour des finesses de 4400 cm^2/g et 6000 cm^2/g de PB et par rapport au mortier témoin, il est observé une augmentation de l'absorption d'eau par immersion pour les mélanges conservés à l'air libre. La PB génère une diminution de porosité et une légère augmentation du retrait qui reste toujours inférieur à celui du MAP témoin.

Enfin, il a été montré que la substitution du ciment par de PV et PB améliore la résistance à haute température et réduit l'expansion due à la réaction alcali-silice (RAS) des MAP.
L'incorporation combinée de PV et de PB a un effet nettement bénéfique et significatif sur les performances et la durabilité des MAP.

Mots clés : Mortier autoplaçant ; Poudre de verre ; Poudre de brique ; Finesse ; Résistance mécanique ; Durabilité ; Microstructure.

Abstract

Self-compacting concrete (SCC) represents a real technical revolution in the field of construction and civil engineering. Their high fluidity and stability require a high volume of paste, which often leads to a high consumption of cement. This may cause the increasing of the SCC cost and the emission of CO2 into the environment. The valorization of waste glass and fired brick as alternative cementitious materials could constitute an interesting ecological and economical alternative.

This present work contributes to the valorization of waste glass and fired brick as alternative cementitious materials in the composition of self-compacting mortars (SCM). The influence of the substitution content as well as the effect of the specific surface area of the cementitious additions used is studied. The cement is partially substituted with 8%, 12%, 16%, 20%, and 24% of glass powder (GP) and with 4%, 8%, 12%, 16%, and 20% of brick powder (BP), separately. These powders are ground to three different fineness levels: 3300 cm^2/g, 4400 cm^2/g, and 6000 cm^2/g. After determining the optimum of each binary composite (Cement + GP and Cement + BP), the combined effect of these cementitious additions in a ternary composite (80% Cement + 12% GP + 8% BP) is then studied.

The experimental results show that the substitution of cement with GP improves the workability of the SCM regardless of its specific surface area. In contrast, BP leads to a reduction in the workability of the SCM, this effect is more significant at higher fineness levels. At the hardened state, an improvement in long-term mechanical properties is observed with the increase in specific surface area and the substitution rate of cement with GP and BP. Moreover, the incorporation of GP reduces the porosity and water absorption by immersion of the SCM, while also decreasing shrinkage. However, for fineness levels of 4400 cm^2/g and 6000 cm^2/g of BP, an increase in water absorption by immersion is observed for the mixtures stored in open air compared to the control mortar. BP generates a decrease in porosity and a slight increase in shrinkage, which remains lower than that of the control SCM.

Finally, it has been shown that the substitution of cement with GP and BP improves high-temperature resistance and reduces expansion due to alkali-silica reaction (ASR) in the SCM. The combined incorporation of GP and BP has a distinctly beneficial and significant effect on the performance and durability of the SCM.

Keywords: Self-compacting mortar; Glass powder. Brick powder; Finenesses; Mechanical strength; Durability; Microstructure.

ملخص

تمثل الخرسانة المرصوصة ذاتيا (خ.م.ذ) ثورة حقيقية في مجال البناء والهندسة المدنية وتتطلب سيولتها واستقرارها الكبيرين تركيز عالي من العجينة الإسمنتية مما يؤدي غالبا الى استهلاك مرتفع للإسمنت وهذا يؤدي الى زيادة في تكلفة الخرسانة المرصوصة ذاتيا وانبعاث غاز ثنائي أكسيد الكربون في المحيط. ان إعادة استخدام نفايات الزجاج والآجر في المواد الاسمنتية لاستبدال الاسمنت يمكن ان يشكل بديلا بيئيا واقتصاديا مثير للاهتمام.

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تثمين استخدام نفايات الزجاج والآجر كمواد اسمنتية بديلة في تركيب الملاط المرصوص ذاتيا (م.م.ذ). تمت دراسة تأثير نسبة الاستبدال وكذلك تأثير درجة نعومة المواد الاسمنتية المضافة. تم استبدال الاسمنت جزئيا ب 8%، 12%، 16%، 20%، و24% من مسحوق الزجاج و4%، 8%، 12%، 16%، و20% من مسحوق الآجر بشكل منفصل. تم طحن الإضافات الاسمنتية الى ثلاث درجات نعومة مختلفة: 3300 سم²/غ، 4400 سم²/غ، و6000 سم²/غ. بعد تحديد النسب الأمثل لكل مركب ثنائي (إسمنت + مسحوق الزجاج) و (إسمنت + مسحوق الآجر)، تمت دراسة التأثير المشترك لهذه المواد الإسمنتية في المركب الثلاثي (80% إسمنت + 12% مسحوق الزجاج + 8% مسحوق الآجر).

اظهرت النتائج التجريبية أن استبدال الاسمنت بمسحوق الزجاج يحسن من قابلية تشغيل الملاط المرصوص ذاتيا مهما كانت درجة نعومته. من ناحية اخرى، يؤدي مسحوق الآجر إلى انخفاض في قابلية تشغيل (م.م.ذ)، ويكون هذا التأثير أكثر اهمية مع درجات النعومة العالية.

في الحالة الصلبة، هناك تحسن في الخصائص الميكانيكية على المدى الطويل مع زيادة درجة النعومة ومعدل استبدال الإسمنت بمسحوق الزجاج أو الآجر. علاوة على ذلك فان استخدام مسحوق الزجاج يقلل من المسامية وامتصاص الماء عن طريق الغمر الكلي للملاط المرصوص ذاتيا، مع تقليل الانكماش. ومع ذلك، بالنسبة لدرجات نعومة 4400 سم²/غ و6000 سم²/غ لمسحوق الآجر، لوحظ زيادة في امتصاص الماء عن طريق الغمر الكلي بالنسبة للمخاليط المخزنة في الهواء الطلق. يؤدي مسحوق الآجر إلى تقليل في المسامية وزيادة طفيفة في الانكماش ولكن يظل أقل من الملاط المرصوص ذاتيا الشاهد.

أخيرا ثبت ان استبدال الاسمنت بمسحوق الزجاج والآجر يحسن مقاومة درجات الحرارة العالية ويقلل من تفاعل السيليكا للملاط المرصوص ذاتيا. كما أن الدمج المشترك بين مسحوق الزجاج والآجر له تأثير مفيد وهام بشكل واضح على اداء ومتانة الملاط المرصوص ذاتيا.

الكلمات المفتاحية : الملاط المرصوص ذاتيا ; مسحوق الزجاج ; مسحوق الآجر ; درجة النعومة ; المقاومة الميكانيكية ;الديمومة ; البنية المجهرية .

Table des matières

Remerciements I
Résumé II
Table des matières V
Liste des figures X
Liste des tableaux XIV
Liste des symboles et des abréviations XVI
Introduction générale 1

CHAPITRE I

État de l'art sur l'utilisation des PV et PB dans l'industrie du béton

I.1. Introduction 5
I.2. Impact environnemental des déchets 6
I.2.1. Production de ciment et son émission de CO2 dans le monde 6
I.2.2. Production de ciment et l'émission de CO2 en l'Algérie 9
I.3. Béton avec du verre comme ajout cimentaire 10
I.3.1. Obtention du verre 11
I.3.2. Recyclage des déchets de verre dans le monde 12
I.3.3. Recyclage des déchets de verre en Algérie 13
I.3.4. Effet du verre sur l'ouvrabilité et le Temps de prise 14
I.3.5. Effet du verre sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers 25
I.3.5.1. Résistance à la compression 25
I.3.5.2. Résistance à la traction-flexion 33
I.3.5.3. Densité 34
I.3.5.4. Module d'élasticité 34
I.3.6. Effet de la poudre de verre sur la durabilité des bétons 34
I.3.6.1. Absorption d'eau 34
I.3.6.2. Retrait de séchage 36
I.3.6.3. Réaction alcali-silice 36
I.3.6.4.Résistance à la pénétration des ions chlorure 39
I.3.6.5. Attaque des sulfates 39
I.3.6.6. Résistance aux gels-dégels 40
I.4. Intérêt de l'utilisation des déchets de brique comme ajout cimentaire dans le béton 40
I.4.1. Fabrication des briques 41
I.4.2. Recyclage des déchets de briques dans le monde 42

I.4.3. Effet de la poudre de brique sur l'ouvrabilité et le temps de prise.....43
I.4.4. Effet de la poudre de brique cuite sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers...46
I.4.4.1. Résistance à la compression.....46
I.4.4.2. Résistance à la traction-flexion.....54
I.4.4.3. Module d'élasticité.....54
I.4.5. Effet de la brique sur la durabilité des bétons/mortiers.....55
I.4.5.1. Absorption d'eau.....55
I.4.5.2. Retrait.....55
I.4.5.3. Réaction alcali-silice RAS.....56
I.4.5.4. Résistance à la pénétration des ions chlorure.....57
I.4.5.5. Attaque des sulfates.....57
I.5. Conclusion.....57

CHAPITRE II

Généralités et propriétés des bétons et mortiers autoplaçants

II.1. Introduction.....60
II.2. Composition des BAP.....60
II.3. Formulations des BAP.....61
1I.3.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon).....61
II.3.2. Formulation CBI (Suéde).....63
II.3.3. Formulation CBI modifiée.....64
II.3.4. Formulation LCPC (France).....64
II.3.5. Formulation japonaise.....65
II.4. Propriétés recherchées des bétons et mortiers autoplaçants.....65
II.4.1. Capacité au remplissage.....66
II.4.2. Capacité de Passage.....66
II.4.3. Résistance à la ségrégation.....67
II.4.4. Rhéologie.....67
II.5. Facteurs influençant les propriétés des BAP et MAP à l'état frais.....68
II.6. Caractérisation de BAP et MAP à l'état frais.....71
II.6.1. Essai d'étalement (Slump flow).....72
II.6.2. Essai à la boite en L (L-Box).....72
II.6.3. Essai d'entonnoir (V-Funnel).....73
II.6.4. Essai de stabilité au tamis.....73
II.7. Caractérisations des BAP et MAP à l'état durci.....73
II.7.1. Résistance à la compression.....74
II.7.2. Résistance à la traction par flexion.....74

II.7.3. Module d'élasticité 75
II.7.4. Retrait 75
II.8. Durabilité et propriétés de transport des MAP et BAP 76
II.8.1. Porosité 76
II.8.2. Absorption capillaire 77
II.8.3. Résistance au feu 77
II.9. Application des BAP et MAP 80
II.9.1. Application des BAP et MAP en Algérie 81
II.10. Conclusion 87

CHAPITRE III

Matériaux et essais

III.1. Introduction 89
III.2. Présentation du plan expérimental 89
III.3. Caractérisation des matériaux utilisés 90
III.3.1. Ciment 90
III.3.2. Déchets de verre 90
III.3.3. Déchets de brique 91
III.3.4. Sable 95
III.3.5. Eau de gâchage 96
III.3.6. Superplastifiant 97
III.4. Formulation 97
III.4.1. Formulation du Mortier (MAP) 97
III.5. Procédure de malaxage 98
III.6. Conditionnement et conservations des éprouvettes 98
III.7. Essais sur MAP à l'état frais 99
III.7.1. Essais au Mini-Cône 99
III.7.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) 99
III.8. Essais sur MAP à l'état durci 100
III.8.1. Résistance à la compression 100
III.8.2. Résistance à la traction par flexion 100
III.8.3. Absorption d'eau par immersion totale 100
III.8.4. Porosité accessible à l'eau 100
III.8.5. Retrait 101
III.8.6. Réaction alcalis-silice 102
III.8.7. Résistance à haute température 102
III.8.8. Observation par microscope électronique à balayage (MEB) 104

III.9. Conclusion 104

CHAPITRE IV

Effet de PV et PB sur le comportement des MAP à l'état frais et durci

IV.1. Introduction 106
IV.2. Optimisation des rapports S/M et SP/L 106
IV.3. Influence des PV et PB comme ajout cimentaire sur l'ouvrabilité des MAP 107
IV.3.1. Influence de la teneur et la finesse du PV sur l'ouvrabilité des MAP 109
IV.3.1.1. Essai d'étalement au mini-cône 109
IV.3.1.2. Essai d'écoulement au V-Funnel 111
IV.3.2. Influence de la teneur et la finesse de la poudre de la brique PB sur l'ouvrabilité des MAP 112
IV.3.2.1. Essai d'étalement au mini-cône 112
IV.3.2.2. Essai d'écoulement au V-Funnel 113
IV.4. Influence des PV et PB comme ajout cimentaire sur la résistance à la compression des MAP 114
IV.4.1. Influence du PV sur le développement de la résistance à la compression 114
IV.4.1.1. Résistance à la compression des MAP-PV conservés dans l'eau 115
IV.4.1.2. Résistance à la compression des MAP-PV conservés à l'air libre 118
IV.4.2. Influence du PB sur le développement de la résistance à la compression 120
IV.4.2.1. Résistance à la compression des MAP-PB conservés dans l'eau 121
IV.4.2.2. Résistance à la compression des MAP-PB conservés à l'air libre 123
IV.5. Influence de la PV et PB sur le développement de la Résistance à la flexion 126
IV.5.1. Résistance à la flexion des MAP-PV conservés dans l'eau 126
IV.5.2. Résistance à la flexion des MAP-PV conservés à l'air libre 128
IV.5.3. Résistance à la flexion des MAP-PB conservés dans l'eau 131
IV.5.3. Résistance à la flexion des MAP-PB conservés à l'air libre 133
IV.6. Influence de la PV et PB sur l'évolution de l'absorption par immersion totale 136
IV.6.1 Absorption par immersion totale des MAP-PV conservés dans l'eau 136
IV.6.2 Absorption par immersion totale des MAP-PV conservés à l'air libre 138
IV.6.3. Absorption par immersion totale des MAP-PB conservés dans l'eau 141
IV.6.4. Absorption par immersion totale des MAP-PB conservés à l'air libre 143
IV.7. Influence de la PV et PB sur la porosité 146
IV.7.1. Porosité des MAP-PV conservés dans l'eau 146
IV.7.2. Porosité des MAP-PV conservés à l'air libre 148
IV.7.3. Porosité des MAP-PB conservés dans l'eau 150
IV.7.4. Porosité des MAP-PB conservés à l'air libre 152
IV.8. Influence de la PV et PB sur le retrait 154

IV.8.1. Retrait des MAP-PV 154
IV.8.2. Retrait des MAP-PB 157
IV.9. Influence de la PV et PB sur la réaction alcali-silice (RAS) 160
IV.9.1. Réaction alcali-silice des MAP-PV 160
IV.9.2. Réaction alcali-silice des MAP-PB 161
IV.10. Influence de la PV et PB sur la résistance à haute température 164
IV.10.1. Résistance à haute température des MAP-PV 164
IV.10.2. Résistance à haute température des MAP-PB 166
IV.11. Analyse microstructurale 168
IV.12. Comparaison des résultats entre les compositions avec PV et PB 170

CHAPITRE V

Effet de composite ternaire (CIMENT+PV+PB) sur le comportement des MAP à l'état frais et durci

V.1.Introduction 175
V.2.Essai d'étalement au mini-cône 175
V.3. Essai d'écoulement au V-funnel 176
V.4. Résistance à la compression 177
V.4.1. Résistance à la compression des MAP avec 12%PV+8%PB (conservation dans l'eau et à l'air libre) 177
V.5. Résistance à la flexion 179
V.5.1. Résistance à la flexion des MAP avec 12%PV+8%PB (conservation dans l'eau et à lair libre) 179
V.6. Absorption d'eau par immersion totale 180
V.7. Porosité 182
V.8. Retrait 183
V.9. Réaction alcali-silice (RAS) 184
V.10. Résistance à haute température 185
V.11. Analyse microstructurale 187
V.12. Conclusion 189
Conclusion générale et perspectives 195
Conclusion générale et perspectives 192
Références bibliographiques 195

ANNEXE

Exemple de calcul de la composition de mortier 216
Production scientifique 220

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Comparaison de la production entre le ciment et l'acier 07
Figure I.2: Consommation estimée de matériaux courants 2002–2005 07
Figure I.3: Scénario de consommation élevée de ciment de l'AIE dans le futur, Consommation par région 08
Figure I.4: Émission de CO2 à cause de la production du ciment 09
Figure I.5: Production du ciment en Algérie 10
Figure I.6 : Différent type des déchets de verre 11
Figure I.7 : Effet de FMWG sur l'affaissement de béton 14
Figure I.8 : Effet de la poudre de verre sur l'étalement relatif des pates par rapport au témoin 15
Figure I.9 : Effet de la PV sur l'affaissement de béton 17
Figure I.10 : Valeur d'affaissement en fonction de % de remplacement 18
Figure I.11 : Diamètre de l'étalement avec déférent % de poudre de verre 19
Figure I.12 : Temps en V-Funnel en fonction de % de PV, L-Box en fonction de % de PV 19
Figure I.13 : Diamètre d'étalement en fonction de % de PV 20
Figure I.14 : Résultats des mesures de consistance, et de temps de début et fin de prise des mélanges CPA + PV en fonction du % de PV 21
Figure I.15: Valeurs d'affaissement des bétons avec des quantités variables de la poudre de verre 21
Figure I.16 : Temps de prise des bétons conventionnels 22
Figure I.17: Temps de prise des bétons à haute performance 23
Figure I.18: Etalement des pâtes contenant PV-1 en fonction de dosage en SP à 5 min du contact eau-liant 24
Figure I.19: Etalement des pâtes contenant PV-2 en fonction de dosage en SP à 5 min du contact eau-liant 25
Figure I.20: Résistances à la compression des mélanges de béton de poudre de verre et fumé de silice comparées au témoin 26
Figure I.21 : Résistance à la compression des bétons E/L=0 ,42 27
Figure I.22 : Résistance à la compression à différents âges 28
Figure I.23 : Résistance à la compression en fonction de % de remplacement de poudre de verre 29
Figure I.24 : Évolution de la résistance en compression dans le temps en fonction du dosage de la poudre de verre 30
Figure. I.25:Développement de la résistance à la compression avec différents % de poudre de verre 30
Figure I.26 : Effet de FMWG sur la résistance à la compression de béton. 31
Figure I.27: Effet du remplacement du ciment par la poudre de verre sur la résistance à la compression à différents âges après durcissement normal (NC) et durcissement à chaud (HC) 31
Figure I.28: Résistance à la compression des mortiers 32
Figure I.29: Taux d'absorption d'eau du mortier en poudre de verre recyclé après 34

28 jours de durcissement
Figure I.30: Effet de la poudre de verre sur l'absorption de l'eau 35
Figure I.31: Expansion RAS des barres de mortier 37
Figure I.32: Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles 37
Figure I.33: Réaction alcali-silice des mortiers avec de la poudre de verre. 38
Figure I.34: Effet de la teneur en poudre de verre sur l'expansion RAS des barres de mortier de ciment à différents âges de durcissement. a- âge de cure de 14 jours, b- âge de cure de 28 jours, c -âge de cure de 35 jours 38
Figure I.35 : Pénétrabilité des ions chlorures à 28 jours des bétons incorporant 30 % d'ajouts cimentaires 39
Figure I.36: Affaissement du béton 43
Figure I.37 : Effet de la poudre de brique (CBP) sur l'affaissement des bétons. 44
Figure I.38 : Effet de la finesse de Blaine de la brique recyclé sur l'écoulement des mortiers autoplaçant 45
Figure I.39 : Résistance à la compression des mortiers 47
Figure I.40 : Indice d'activité de résistance des échantillons de mortier contenant de la brique concassée broyée 48
Figure I.41 : Résistance à la compression des pâtes contenant du SCBP de groupe A (finesse de 4600 cm2/g) dans différentes conditions de durcissement : (a) un durcissement standard (20 C); (b) traitement à la vapeur (80 C) 49
Figure I.42 : Résistance à la compression des pâtes contenant du SCBP de groupe B(finesse de 6320 cm2/g) dans différentes conditions de durcissement : (a) un durcissement standard (20 C); (b) traitement à la vapeur (80 C) 49
Figure I.43 : Résistance à la compression des mortiers avec un rapport E/C=0,4 50
Figure I.44 : Résistance à la compression des mortiers avec un rapport E/C=0,5 51
Figure I.45 : Résistance à la compression en fonction de % de remplacement par PB 52
Figure I.46 : Effet du PB sur la résistance à la compression du mortier 52
Figure I.47 : Résistance à la compression pour tous les mélanges 53
Figure I.48: Module d'élasticité des mortiers 54
Figure I.49.Variation du retrait en fonction de la teneur en briques 55
Figure I.50: Courbes d'expansion des échantillons contenant différentes quantités de SB et WB 56
Figure II.1: Les composants de BO et BAP 61
Figure II.2 : Dimensions de mini-cône destiné à l'étalement de mortier. 62
Figure II.3 : Dimensions de mini-entonnoir en V destiné à l'écoulement de mortier. 63
Figure II.4 : Blocage des granulats au droit des armatures 69
Figure II.5 : A : Etat initial (Avant l'action du superplastifiant) B : Défloculation des grains de ciment 71
Figure II.6 : Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique 78
Figure II.7 : Mécanismes liés aux incompatibilités pâte -granulat 79
Figure II.8 : Déformations thermiques de bétons formules avec différents granulats 80
Figure III.1 : Déchets de verre (a) avant broyage, (b) après broyage. 90
Figure III.2 : Processus de recyclage, concassage et broyage de déchets de briques et du verre. 91

Figure III.3 : Déchets de brique : (a) avant broyage,(b) après broyage. 91
Figure III.4: Analyse minéralogique par DRX (a) Ciment, (b) PV, (c) PB. 93
Figure III.5: EDX verre 94
Figure III. 6: Images MEB (a) poudre de verre, (b) poudre de brique. 95
Figure III.7: Sable de Oued-Souf utilisé. 95
Figure III.8: Courbe granulométrique du sable utilisé. 96
Figure III.9: Séquence de malaxage du mortier autoplaçant. 98
Figure III.10 : Eprouvettes prismatiques confectionnées. 99
Figure III.11 : Essai de porosité. 101
Figure III.12 : Essai de réaction alcali-silice (RAS). 102
Figure III.13 : Résistance à haute température. 103
Figure IV.1: Variation de l'étalement des MAP à base de PV avec différentes finesses. 110
Figure IV.2: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de PV avec différentes finesses. 111
Figure IV.3: Variation de l'étalement des MAP à base de PB avec différentes finesses. 113
Figure IV.4: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de PB avec différentes finesses. 114
Figure IV.5: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g). 115
Figure IV.6: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g). 116
Figure IV.7: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F3 : 60000 cm^2 /g). 116
Figure IV.8: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g). 118
Figure IV.9: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g). 119
Figure IV.10: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F3 : 6000 cm^2 /g). 119
Figure IV.11: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g). 121
Figure IV.12: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g). 121
Figure IV.13: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g). 122
Figure IV.14: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g). 123
Figure IV.15: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g). 124
Figure IV.16: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g). 124
Figure IV.17: Résistance à la flexion des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g). 126
Figure IV.18: Résistance à la flexion des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g). 127
Figure IV.19: Résistance à la flexion des MAP au PV (F3 : 6000 cm^2 /g). 127
Figure IV.20: Résistance à la flexion des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g). 129
Figure IV.21: Résistance à la flexion des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g). 129
Figure IV.22: Résistance à la flexion des MAP au PV (F3 : 6000 cm^2 /g). 130
Figure IV.23: Résistance à la flexion des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g). 131

Figure IV.24: Résistance à la flexion des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g). 132
Figure IV.25: Résistance à la flexion des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g). 132
Figure IV.26: Résistance à la flexion des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g). 134
Figure IV.27: Résistance à la flexion des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g). 134
Figure IV.28: Résistance à la flexion des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g). 135
Figure IV.29. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conserver dans l'eau. 136
Figure IV.30. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conserver dans l'eau. 137
Figure IV.31. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conserver dans l'eau. 137
Figure IV.32. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conserver à l'air libre. 139
Figure IV.33. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conserver à l'air libre. 139
Figure IV.34. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conserver à l'air libre. 140
Figure IV.35. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conserver dans l'eau. 141
Figure IV.36. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conserver dans l'eau. 142
Figure IV.37. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conserver dans l'eau. 142
Figure IV.38. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conserver à l'air libre. 144
Figure IV.39. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conserver à l'air libre. 144
Figure IV.40. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conserver à l'air libre. 145
Figure IV.41: Porosité des MAP-PV conserver dans l'eau à 28 jours. 146
Figure IV.42: Porosité des MAP-PV conserver dans l'eau à 400 jours. 147
Figure IV.43: Porosité des MAP-PV conserver à l'air libre à 28 jours. 148
Figure IV.44: Porosité des MAP-PV conserver à l'air libre à 400 jours. 149
Figure IV.45: Porosité des MAP-PB conserver dans l'eau à 28 jours. 150
Figure IV.46: Porosité des MAP-PB conserver dans l'eau à 28 jours. 151
Figure IV.47: Porosité des MAP-PB conserver à l'air libre à 28 jours. 152
Figure IV.48: Porosité des MAP-PB conserver à l'air libre à 400 jours. 153
Figure IV.49. Retrait des MAP-PV (F1 :3300 cm^2/g). 154
Figure IV.50. Retrait des MAP-PV (F2 :4400 cm^2/g). 155
Figure IV.51. Retrait des MAP-PV (F3 :6000 cm^2/g). 155
Figure IV.52. Retrait des MAP-PB (F1:3300 cm^2/g). 157
Figure IV.53. Retrait des MAP-PB (F2:4400 cm^2/g). 157
Figure IV.54. Retrait des MAP-PB (F3:6000 cm^2/g). 158
Figure. IV.55. Réaction alcali-silice (RAS) des MAP-PV. 160
Figure. IV.56. Réaction alcali-silice (RAS) des MAP-PB. 161
Figure IV.57. Examen au MEB du MAP témoin après le test de RAS 163
Figure IV.58. Examen au MEB du MAP à 12% PV après le test de RAS 163
Figure IV.59. Examen au MEB du MAP à 8% PB après le test de RAS 164
Figure IV.60. Résistance à haute température des MAP-PV durci dans a) l'eau b) l'air. 165

Figure IV.61. Résistance à haute température des MAP-PB durci dans c) l'eau d) l'air 167
Figure IV.62. Examen au MEB du mélange pour le MAP Témoin (a,b,c). 168
Figure IV.63. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base de 20%PV F2 (a,b,c). 169
Figure IV.64. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base de 20%PB F2 (a,b,c). 170
Figure V.1. Variation de l'étalement des MAP avec 12%PV+8%PB. 176
Figure V.2. Variation du temps d'écoulement des MAP avec 12%PV+8%PB. 177
Figure V.3. Résistance à la compression des MAP avec 12%PV+8%PB. 178
Figure V.4. Résistance à la flexion des MAP avec 12%PV+8%PB. 180
Figure V.5. Absorption d'eau des MAP avec 12%PV+8%PB. 181
Figure V.6. Porosité des MAP avec 12%PV+8%PB. 183
Figure V.7. Retrait des MAP avec 12%PV+8%PB. 184
Figure V.8. Expansion RAS des MAP avec 12%PV+8%PB. 185
Figure V.9. Résistance à haute température des MAP avec 12%PV+8%PB. 187
Figure V.10. Examen au MEB du MAP Témoin (a,b,c). 188
Figure V.11. Examen au MEB du MAP avec 12%PV+8%PB (a,b,c). 189

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Quantité des déchets de verre et le taux de recyclage pour différents pays du monde. 13
Tableau I.2 : Affaissement des bétons E/L =0,49. 15
Tableau I.3 : Affaissement et teneur en air des bétons. 16
Tableau I.4 : Consistance et prise de quelques mortiers confectionnés. 16
Tableau I.5 : Résultat de la maniabilité de déférents mortiers confectionnés. 17
Tableau I.6 : Propriétés rhéologiques mesurées sur les BAP. 23
Tableau II.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage. 66
Tableau II.2 : Essais permettant la détermination de la capacité de passage. 67
Tableau II.3 : Classe d'étalement. 72
Tableau III.1 : Compositions chimiques et propriétés physiques de Ciment, PV et PB. 92
Tableau III.2 : Propriétés physiques d'identification de sable. 96
Tableau IV.1 : Résultats des essais sur mortier autoplaçant pour différents % de Sp,E/C et S/M. 107
Tableau IV.2 : Composition des différentes MAP étudiés sur un 1 m3. 108
Tableau IV.3: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de PV. 109
Tableau IV.4: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de PB. 112
Tableau IV.5 : Résultats des tests de durabilité des compositions optimales des mortiers fabriqués avec des poudres de verre et de briques. 171

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

AIE : Agence internationale de l'énergie ;
ASTM : American society for testing materials;
Al_2O_3 : Alumine ;
BAP : Béton autoplaçant ;
BHP : Bétons hautes performances ;
BO : Bétons ordinaire ;
BV : Béton vibré ;
CEM I/42.5 R : Ciment Portland de Classe 42,5 Résistant ;
CH : Hydroxyde de calcium ;
C-S-H : Silicate de calcium hydraté ;
C_3A : Aluminate tricalcique (célite) ;
C_3S : Silicate tricalcique (Alite) ;
C_2S : Silicate bicalcique (bélite) ;
C_4AF : Alumino-ferrite tétracalcique ;
Ca CO_3 : Carbonate de calcium ;
Ca Mg $(CO_3)_2$: Carbonate de calcium et Magnésium ;
$Ca(OH)_2$: Portlandite ;
CaO : Oxyde de calcium ou chaux vive ;
C&D : Déchets de construction et de démolition ;
CNRC : Centre national du registre de commerce ;
CO_2 : Dioxyde de carbone ;
C.P.A : Ciment Portland artificiel ;
CV : Cendre volante ;
Dmax : Diamètre maximal des granulats ;
DRX : Diffractométrie aux rayons X ;
E/C : Eau/Ciment ;
E/L : Eau/Liant ;
E/P : Eau/Poudre ;
EDX : Energie dispersifs des rayons X ;
EPA : Environmental protection agency ;
Fe_2O_3 : Oxyde ferrique (hématite) ;
GICA : Groupe industriel des ciments d'Algérie ;
G/S : Gravillon/ sable ;
L : Laitier de haut fourneau;
MAP : Mortier autoplaçant ;
MAPT : Mortier autoplaçant témoin ;
MAP-PV : Mortier à base de la poudre de verre ;
MAP-PB : Mortier à base de la poudre de brique ;
MEB : Microscope électronique à balayage ;
MCS : Matériaux cimentaires supplémentaires ;
MK : Métakaolin ;
Na_2O : Oxyde sodium ;
OCDE : Organisation de coopération et de développement économique ;
PB : Poudre de brique ;
PV : Poudre de verre ;
PZ : Pouzzolane ;
PM : Poudre de marbre ;

RAS : Réaction alcali-silice ;
Rc : Résistance à la compression ;
Rf : Résistance à la flexion ;
R*t* : Résistance à la traction ;
RCR : Résistance à la compression résiduelle ;
SCC : Self-Compacting Concrete ;
SiO_2 : Silice ;
SSP : surface spécifique d'une poudre ;
S/M : Sable/Mortier ;
Sp : Superplastifiant ;
Sp/L : Superplastifiant/Liant ;
T : Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques années, la prise de conscience de la protection écologique et environnementale devient de plus en plus forte partout dans le monde et il est reconnu que l'une des principales sources de la pollution de l'environnement est constituée de déchets solides et liquides. L'environnement reçoit des millions de tonnes de déchets, y compris du plastique, du verre, et les déchets de construction et de démolition qui contribuent à un nombre de problèmes environnementaux. Un des moyens efficaces d'utiliser ces déchets est le recyclage, qui non seulement minimise les espaces d'enfouissement et réduit la quantité de déchets déposés, mais conserve également les ressources naturelles de la terre, montrant le bon effet écoenvironnemental.

L'utilisation incontrôlée et aveugle du béton épuise les ressources naturelles, comme constituants principaux tels que les granulats fins et grossiers qui sont extraits des roches naturelles mais aussi l'utilisation du ciment contribue à la production d'un volume élevé de gaz à effet de serre entraînant le réchauffement climatique. Ces problèmes posent un grand défi pour les ingénieurs et les chercheurs d'aujourd'hui pour s'occuper des alternatives possibles pour produire un béton respectueux de l'environnement. En dehors de cela, il y avait de nombreux déchets industriels comme les scories d'acier, les déchets de verre, les déchets de brique, les cendres volantes, etc, qui sont déposés dans les dépotoirs sans aucun but.

Le terme « ciment vert » prend sa place en tant que produit environnemental. En d'autres termes, il renvoie à l'utilisation de nouveaux matériaux pouvant remplacer partiellement le ciment dans le béton sans diminuer ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

L’utilisation du verre dans l’industrie de la construction est parmi les options les plus intéressantes pour valoriser ces déchets, car il peut consommer une quantité importante de ces matériaux. Cependant, le verre lui-même contient une grande quantité de SiO2 amorphe, il a donc une certaine activité pouzzolanique et peut être utilisée comme matériaux cimentaires supplémentaires (MCS).

Un autre matériau qui a un potentiel en tant que matériaux cimentaires supplémentaires, est la brique cuite. C’est un matériau pouzzolanique obtenu par calcination de l'argile à une température comprise entre 850 °C et 1200 °C. Lors des travaux de démolition, une grande quantité de briques en terre cuite est produite, on estime qu'il y aura au moins 5 milliards de tonnes de déchets de construction dans les 5 à 10 prochaines années, tandis que les déchets de briques représentent 30 à 50 %.

Au cours des deux dernières décennies, un béton hautement fluide appelé béton autoplaçant (BAP) a provoqué des changements spectaculaires dans l'industrie du béton. Ce béton innovant dans le domaine de la construction civile, bâtiment et travaux publics revête un intérêt technique et industriel, due à sa capacité à se couler et à remplir le coffrage sous son propre poids, sans aucune vibration ou énergie externe, même dans des espaces étroits avec un renforcement encombré.

La formulation de BAP contient une grande quantité de ciment portland et d'adjuvant pour assurer une meilleure maniabilité. Bien qu'il apporte beaucoup d'avantages au monde de construction, comme le gain du temps et la main d'œuvre, les BAP restent relativement couteux par rapport au béton ordinaire à cause de leurs formulations.

Le mortier autoplaçant (MAP) est la base de béton autoplaçant BAP et les résultats de MAP sont représentatifs pour les BAP. En effet, ce dernier ne nécessite aucune vibration externe et, par son propre poids, peut produire du mortier avec un compactage suffisant et des surfaces lisses. Par conséquent, il peut être utilisé avec une large application comme matériau de réparation du béton. La phase du mortier autoplaçant MAP est une phase très importante, car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, la viscosité et la mobilité du béton ainsi que la stabilité globale du béton.

L'introduction des ajouts cimentaires dans le béton ou mortier pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante. En effet, le coût global du matériau est significativement réduit du fait que certains ajouts permettent d'améliorer la maniabilité sans utilisation massive de superplastifiant ce qui permet de minimiser la quantité de ces derniers dans les compositions des MAP et BAP en plus d'une utilisation moindre de ciment vu qu'il est remplacé en partie par ces ajouts.
La finesse des ajouts cimentaires est aussi un paramètre important. En effet, afin d'assurer une hydratation complète des ajouts cimentaires, il est nécessaire d'augmenter la réactivité de ces derniers, cela est possible par l'augmentation de leur surface spécifique. Ce qui pourra avoir un impact sur les propriétés rhéologiques et les performances mécaniques et de durabilité des MAP et BAP.

C'est dans ce contexte que le présent travail s'inscrit. Il a pour objectif en premier lieu, d'étudier l'influence du type et du dosage de la poudre de verre et de la brique cuite comme ajouts cimentaires pour la fabrication des MAP, ainsi que l'influence de leur finesse, en évaluant expérimentalement leurs effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et de durabilités..
En deuxième objectif est d'étudier l'effet de la combinaison de ces ajouts cimentaires (poudre de verre et de la brique cuite) après avoir déterminé l'optimum de chaque mélange dans la première partie, sur les propriétés des MAP à l'état frais et à l'état durci.

La thèse est rédigée en cinq chapitres plus une introduction générale :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'utilisation de la poudre de verre (PV) dans l'industrie du béton, dans laquelle les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du béton avec de la poudre de verre comme substituant au ciment sont reportées. Dans le même chapitre il est décrit d'après la revue bibliographique réalisée, l'influence de la poudre de brique (PB) comme deuxième ajout, sur le comportement de béton à l'état frais et à l'état durci.

Le deuxième chapitre donne une synthèse des travaux sur les propriétés des bétons et mortiers autoplaçants à l'état frais. Les propriétés rhéologiques et les différentes approches de formulation du BAP et la relation qui existe entre le BAP et son mortier autoplaçant MAP sont détaillées. Le chapitre est terminé par donner les applications des BAP et MAP dans le monde et en Algérie.

Le troisième chapitre est destiné en premier lieu à la caractérisation des matériaux de base utilisés dans la composition du MAP, en second lieu à la confection et la conservation des éprouvettes passant par la formulation et le malaxage, et finalement une description détaillée et donnée des essais réalisés sur les MAP à l'état frais et à l'état durci.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Des commentaires avec une comparaison avec d'autres résultats montrent clairement la variation des propriétés d'ouvrabilité et celle des performances des MAP à l'état durci en présence des poudres de verre et de brique. Le chapitre s'achève par l'identification de l'optimum de finesse et du taux d'incorporation de PV et PB aboutissant à des MAP avec les meilleures propriétés.

Le dernier chapitre présente les résultats de l'ouvrabilité, des propriétés mécaniques et de durabilité du composite ternaire (Ciment+PV+PB).

A la fin, nous présentons une conclusion générale sur les résultats clés de cette recherche ainsi que des perspectives et recommandations pour la poursuite du travail dans cet axe de recherche.

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES POUDRES DE VERRE ET DE BRIQUE DANS L'INDUSTRIE DU BÉTON

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES POUDRES DE VERRE ET DE BRIQUE DANS L'INDUSTRIE DU BÉTON

I.1. Introduction

Avec l'augmentation de la population et les développements qui se produisent dans le monde entier, la réalisation et la durabilité des constructions en ciment et en béton gagne une importance. Cela tourne principalement autour des problèmes d'épuisement des ressources naturelles associés à l'exploitation intensive du ciment et des matières premières en béton, ainsi que des émissions de CO_2 résultant du processus de production du ciment.

Il est important que ces questions soient traitées de manière satisfaisante à la fois pour le bien-être de notre planète et pour la croissance continue de notre société pour les générations à venir. Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés au monde après l'eau. Cependant, la production de ciment portland ordinaire, constituant essentiel du béton, émet de grandes quantités de CO_2 et est également très énergivore. Les granulats occupent la majeure partie du volume de béton et l'utilisation de granulats naturels/vierges n'est pas toujours viable en raison de l'épuisement des ressources naturelles et de l'impact environnemental.
De plus, il n'est pas viable de réduire l'utilisation de ciment et de béton ; cela a un impact sur les opportunités d'emploi associées à l'industrie du ciment, du béton et de la construction et a également un impact sur le développement global des infrastructures de la nation. Par conséquent, les industries du ciment, du béton et de la construction doivent continuer à évoluer avec l'évolution des besoins et des attentes de la société tout en protégeant l'environnement. L'une des mesures nécessaires pour résoudre ce problème consiste à utiliser des matériaux alternatifs et/ou recyclés pour la production de ciment et de béton, de manière sûre et économique [2].
Ces dernières années, l'utilisation de sous-produits industriels prend de l'ampleur avec une prise de conscience croissante de l'environnement et de ses effets potentiellement dangereux [3]. L'ajout de déchets dans les produits de construction pour les routes, les bâtiments et les différentes infrastructures fait partie des applications avantageuses communément proposées. En plus de réduire le degré de déchets éliminés dans les décharges, cette stratégie réduit l'utilisation de matériaux extraits naturellement, réduisant ainsi l'empreinte et l'impact de l'industrie de la construction sur l'environnement naturel [4].

Dans ce chapitre on a présenté une synthèse bibliographique dans lequel il est rappelé les principales recherches menées en relation avec notre travail à savoir l'utilisation de la poudre de verre (PV) et de la poudre de brique (PB) dans l'industrie de béton. Ce chapitre, servira par la suite les différents aspects des bétons et mortiers autoplaçants, notamment des généralités qui concernent leurs émergences, les différentes approches de formulations et méthodes de caractérisation, ainsi leurs applications dans le monde et en Algérie.

I.2. Impact environnemental des déchets

Avec le développement rapide de l'économie et de la société, la durabilité des constructions en ciment et en béton gagne une importance [5]. Cela tourne principalement autour des problèmes d'épuisement des ressources naturelles associés à l'exploitation intensive du ciment et des matières premières en béton, et des émissions de CO_2 du processus de production du ciment. Il est important que ces questions soient traitées de manière satisfaisante à la fois pour le bien-être de notre planète et pour la croissance continue de notre société pour les générations à venir [2]**.**

La forte demande en béton dans la construction industrielle et civile consomme de grands volumes de ressources naturelles et de matières premières et cela a endommagé l'environnement provoquant ainsi un déséquilibre écologique [5]. Minimiser l'utilisation des ressources naturelles et maximiser le potentiel de recyclage sont des tâches très importantes à prendre en considération [6].

De nombreux pays ont souligné le besoin vital de nouveaux matériaux pour soutenir l'économie de la construction, étant donné que les décharges disponibles ne suffisent plus et sont en diminution rapide, alors, une relation a été établie entre ce problème et la demande de récupération de déchets solides non dégradables, pour faire face aux problèmes de durabilité, d'énergie et d'environnement à la fois.

L'une des mesures nécessaires pour résoudre ce problème consiste à utiliser des matériaux alternatifs et/ou recyclés pour la production de ciment et de béton, de manière sûre et économique [2].

I.2.1. Production de ciment et son émission de CO2 dans le monde

Le ciment est un matériau de base pour la construction du bâtiment et du génie civil. Étant donné que la production et la consommation de ciment sont directement liées à presque toutes les activités économiques, elles suivent de près les tendances économiques.

Au cours des 65 dernières années, la quantité de ciment produite a été multipliée par près de 34 fois [7], tandis que la population a augmenté de moins de 3 fois [8,9].Ce taux de croissance est beaucoup plus élevé que d'autres matières premières telles que l'acier [10] (voir figure I.1) .

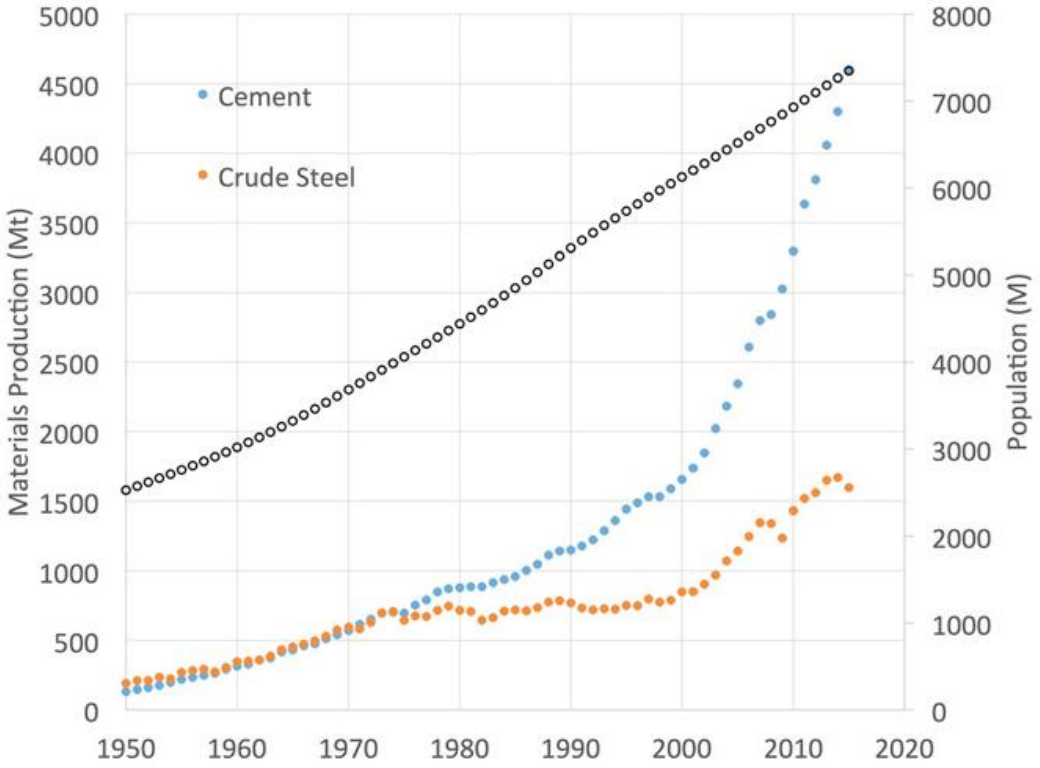


Figure I.1: Comparaison de la production entre le ciment et l'acier [10].

En 2015, la production totale de ciment était de 4,6 milliards de tonnes [8]. Cela correspond à environ 626 kg/par habitant, ce qui est supérieur à la consommation alimentaire humaine [11].

La figure I.2 montre comment les quantités d'autres matériaux de construction courants - tels que le bois, l'acier, l'asphalte et la brique - sont très faibles par rapport au ciment.

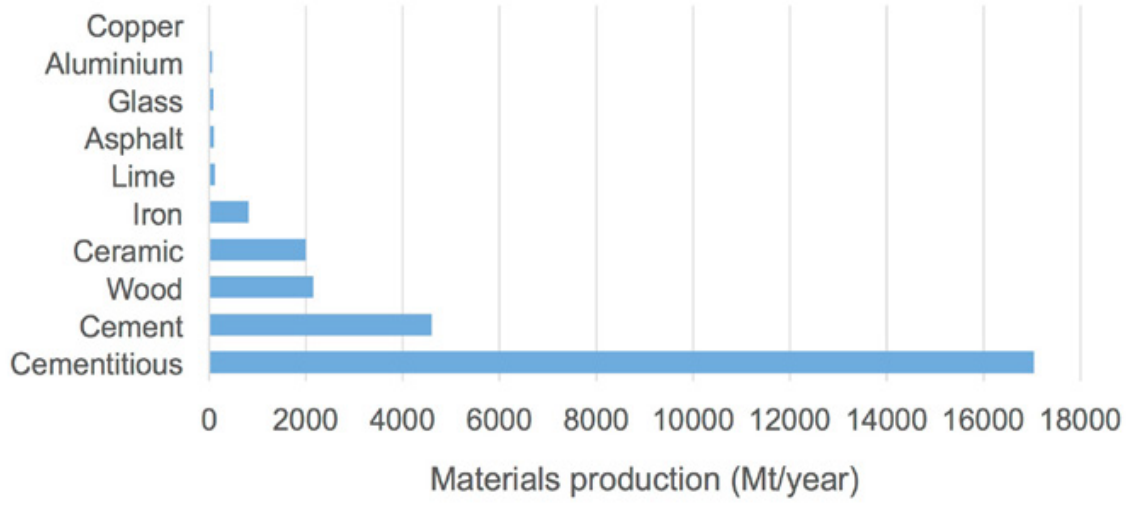


Figure I.2: Consommation estimée de matériaux courants 2002–2005 [10].

Sachant que la demande de ciment a décuplé depuis 1950 à 2015, la production future pourrait dépasser ces valeurs. Environ 90 % du ciment existe actuellement et continuera d'être produit dans des pays non membres de l'OCDE (pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques). La part de la Chine dans la production mondiale a atteint un pic et devrait passer de plus de 50 % aujourd'hui à environ 30 % d'ici 2050. La figure I.3 montre les prévisions de l'AIE (Agence internationale de l'énergie) concernant la demande de ciment jusqu'en 2050 [12].

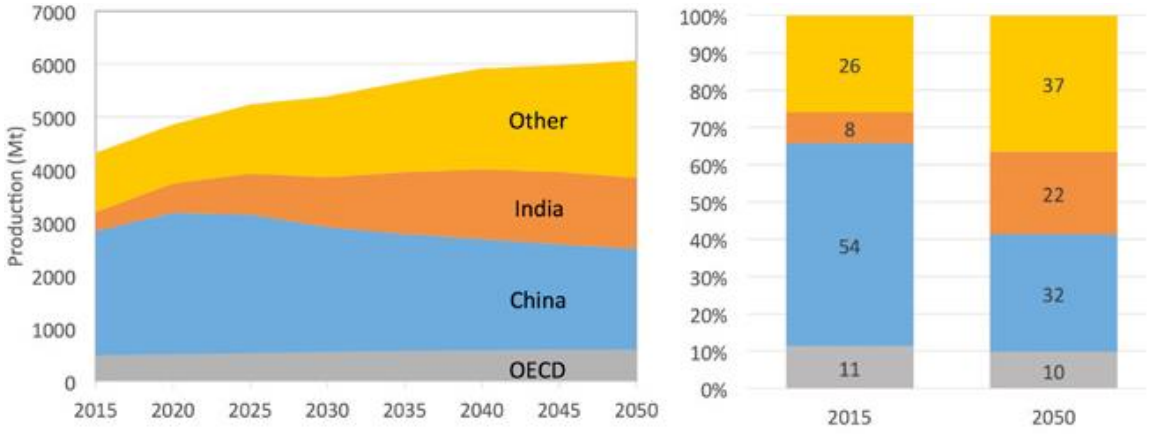


Figure I.3: Scénario de consommation élevée de ciment de l'AIE dans le futur ,Consommation par région [10].

D'autre part l'industrie cimentière est une source majeure d'émissions de CO2, La production de ciment contribue à l'émission de CO2 par la combustion d'énergies fossiles, ainsi que par la décarbonations du calcaire. En raison des deux sources d'émission, et en raison des émissions provenant de production d'électricité, l'industrie de ciment mérite l'attention dans l'évaluation des options de réduction des émissions de carbone [13]**.**

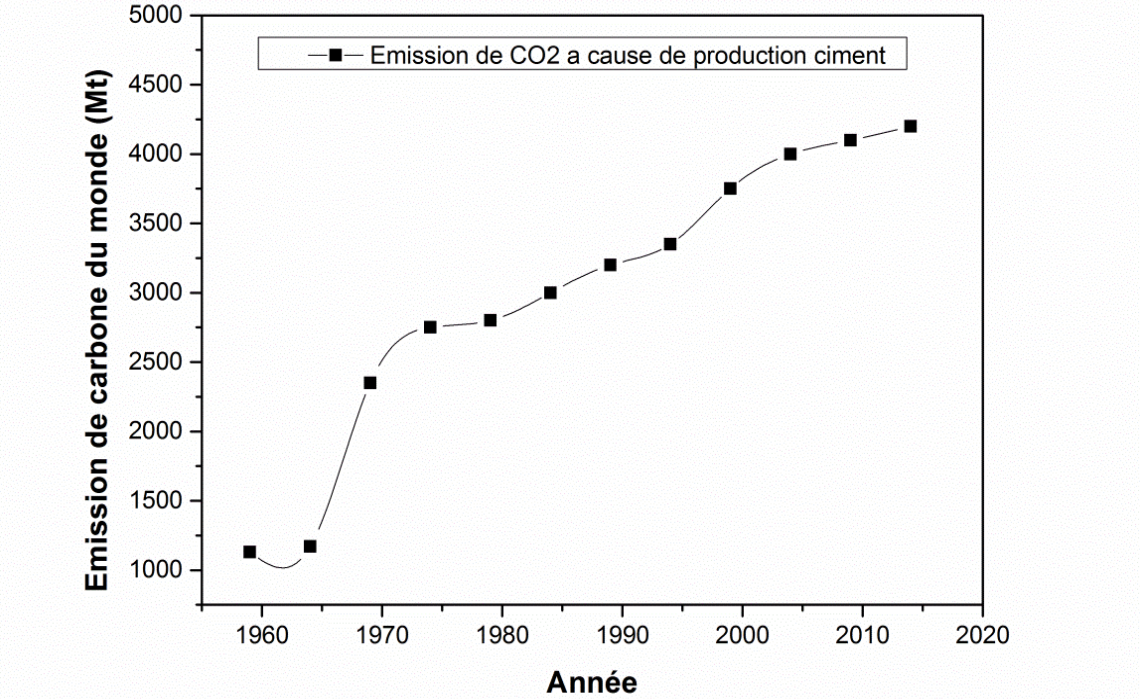


Figure I.4: Émission de CO2 à cause de la production du ciment [14]**.**

I.2.2. Production de ciment et l'émission de CO2 en l'Algérie

Ce secteur ne comprenait que trois cimenteries à l'indépendance, et compte actuellement 17 cimenteries réparties sur tout le territoire national, avec une production de plus de 22 millions de tonnes en 2016 et a dépassé les 25 millions de tonnes en 2017 [15].

D'après Ali Bey Nasri, président de l'Association nationale des exportateurs algériens, la production du ciment en Algérie est passée de 25 millions de tonnes en 2017 à plus de 40 millions de tonnes en 2021 [16].

Cette tendance haussière de la production devrait se confirmer dans les prochaines années après l'entrée en production d'autres projets publics et privés. Il s'agit principalement de quatre projets lancés par le groupe Groupe Industriel des ciments d'Algérie (GICA) : l'extension des capacités de production de deux cimenteries (Chlef et Mascara) et la réalisation de deux nouvelles cimenteries à Oum El-Bouaghi et à Béchar. Un autre opérateur privé, groupe Amouda, compte également réaliser une cimenterie d'une capacité annuelle de 2 millions de tonnes à Laghouat.

Quatre opérateurs économiques activent actuellement dans ce segment dont le groupe public GICA , leader de cette industrie en Algérie avec une production qui avoisine les 13 millions de tonnes en 2016, soit près de 60% de la production nationale.

L'opérateur étranger Lafarge-Holcim, qui produit actuellement plus de 8 millions de tonnes par an, occupe la deuxième place, suivi par deux opérateurs algériens privés qui se sont lancé dans cette activité récemment celle du groupe Lamouri à Biskra et celle de l'entreprise Hamel à Adrar dont la capacité de production est d'un million de tonnes chacune. Sur la base des statistiques présentées sur la carte géographique (Figure I.5),on voit une augmentation de la production du ciment en Algérie.

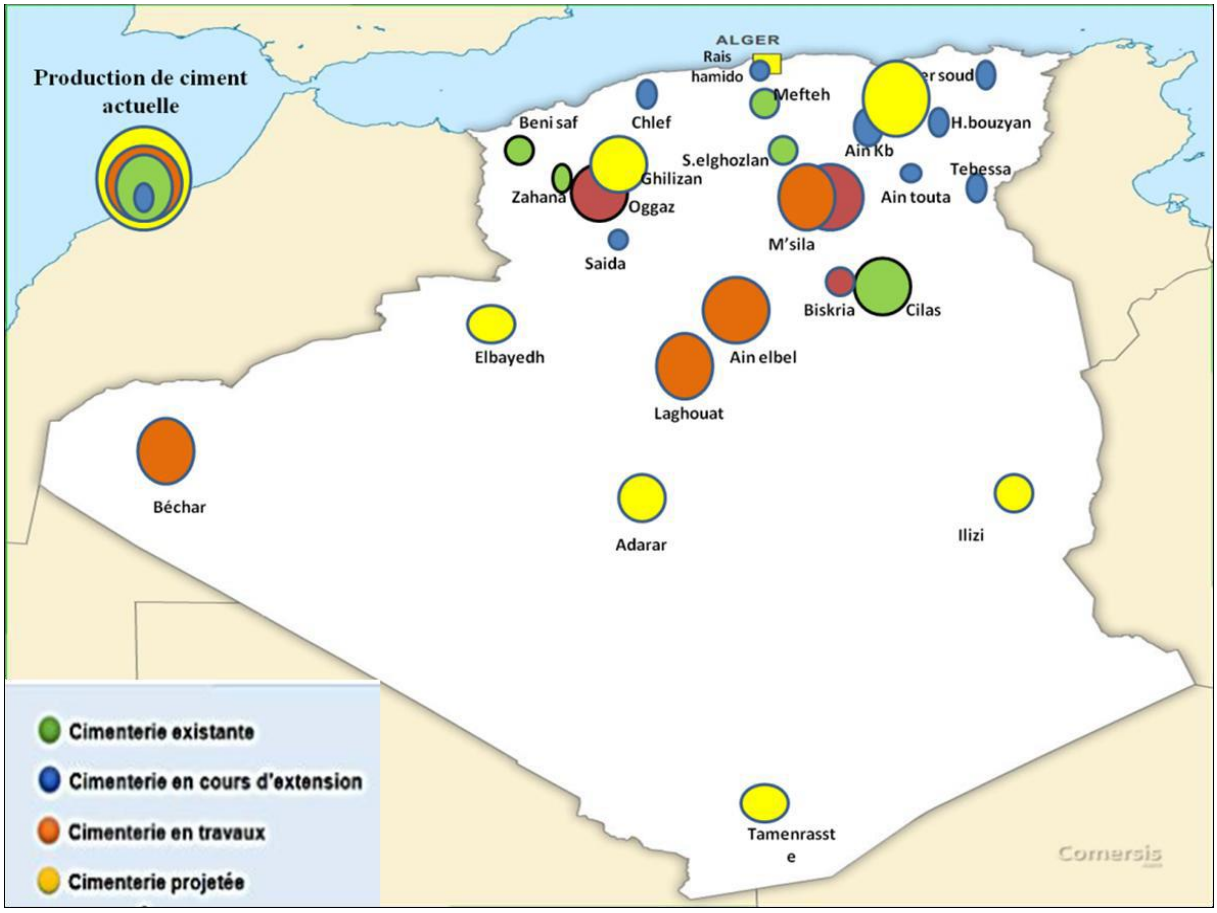


Figure I.5: La production du ciment en Algérie [17]**.**

I.3. Béton avec du verre comme ajout cimentaire

Le verre est un matériau non biodégradable produit sous de nombreuses formes et types, il s'agit notamment de verre d'emballage ou de récipient, bouteille de verre, verre à vitre et verre à tube cathodique (écrans de télévision, moniteurs). C'est également un matériau amorphe qui contient une quantité importante de silice et de calcium [18,17].



Figure I.6 : Différent type des déchets de verre.

Au cours des dernières années les quantités de déchets de verre ont augmenté en raison de l'industrialisation et l'amélioration du niveau de vie. En tant que déchets (figure I.6), il constitue une nuisance majeure pour la gestion des déchets, en particulier en ce qui concerne les activités d'enfouissement [19]. Les matériaux en verre, en raison de leur nature, occupent une grande partie des espaces des sites d'enfouissement, entraînant souvent une grave pollution de l'environnement [20].

Le verre a l'avantage d'être recyclé à l'infini sans modifier les propriétés chimiques en raison de son caractère inerte [21]**.** Ce matériau contient plus de 70% de silice amorphe, ce qui le rend pouzzolanique , donc il constitue un choix idéal pour l'utiliser comme matériaux cimentaires supplémentaires (MCS) [22]**.**

Des recherches actives sur les matériaux alternatifs au ciment ont été menés tels que (cendres volantes, laitier, fumé de silice, pouzzolane …. etc). Les déchets de verre sont un autre matériau qui présente un potentiel en tant que matériau de ciment supplémentaire mais qui n'a pas encore obtenu le même succès commercial [19].

L'utilisation de la poudre de verre pour remplacer partiellement le ciment dans le béton permet non seulement de réduire la consommation de ciment (réduction des couts de production et des émissions de CO_2), et la quantité de déchets à éliminer, mais également de réduire le recours aux sources externes de matières pouzzolaniques.

Cette partie résume l'influence de la poudre de verre en tant que substituant au ciment sur les propriétés rhéologiques, physico- mécaniques et la durabilité du béton/mortier.

I.3.1. Obtention du verre

Le verre est fabriqué en faisant fondre un mélange de silice (oxyde de silicium), de carbonate de sodium, dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) et calcaire ($CaCO_3$) à haute température, jusqu'à 1600 °C.

Le mélange est ensuite refroidi pour se solidifier sans cristallisation. L'état non liquide et non solide fait du verre un matériau solide amorphe. Des additifs spéciaux sont utilisés pour donner aux verres leurs couleurs et propriétés spécifiques [23,24].

La couleur du verre est donnée par les oxydes métalliques présents comme impuretés dans les matières premières ou apportés intentionnellement. Les oxydes de fer et de chrome apportent une couleur verte, ceux de nickel : grise, ceux de manganèse : violette, ceux de cobalt : bleue, ceux de cuivre : rouge ou vert… La couleur ambre, qui protège des rayonnements UV, est donnée par des sulfures de fer (III), en milieu réducteur.

Différentes nuences de verre sont produites en fonction de la composition chimique et de l'additif utilisé, tels que: silice vitreuse, silicates alcalins, verres sodocalciques (récipients, float, feuilles, ampoules et ustensiles de cuisson trempés), verres en borosilicate (appareils chimiques, étanchéité pharmaceutique et au tungstène), verres en plomb (entonnoir de télévisions couleur, tubes au néon, systèmes électroniques) pièces et silex optique dense), lunettes de baryum (panneau de télévision couleur et baryum optique dense) et des verres en aluminosilicate (tubes de combustion, substrats en fibre de verre et à résistance).

I.3.2. Recyclage des déchets de verre dans le monde

La quantité de déchets de verre a progressivement augmenté ces dernières années en raison de l'urbanisation et l'industrialisation ou la plupart des déchets de verre finissent dans les décharges alors que seule une petite quantité est recyclée et qui est principalement concentrée sur le secteur des conteneurs et de l'emballage, cela est dû au côut élevé du nettoyage et du tri des couleurs.

D'après (Environmental protection agency (EPA)) [25]**,** 90% de verre recyclé est utilisé pour fabriquer de nouveaux conteneurs, tandis que les 10% restants sont utilisés pour les applications, telles que les agrégats de plate-forme et l'isolation avec fibre de verre**.**

En 2004, Les Nations unies ont estimé le volume des déchets solides éliminés chaque année à 200 millions de tonnes dont 7% de verre dans le monde entier [26,27].

Le tableau I.1 représente la quantité des déchets de verre et le taux de recyclage pour différents pays du monde.

Tableaux I.1 : la quantité des déchets de verre et le taux de recyclage pour différents pays du monde [28].

Pays	Déchets de verre (tonnes)	Taux de recyclage	Année	Référence
Europe	12,000,000	70%	2011	[29]
Canada	116,000	68%	2009	[30]
U.S.A	11,500,000	28%	2011	[29]
Singapour	72800	29%	2011	[32]
Pologne	300 000	33%	2004	[19]
Portugal	425000	42%	2010	[33]
Turquie	120000	66%	2004	[33]
Allemagne	3, 200,000	94%	2003	[34]
Suède	195,000	93%	2010	[19]
République deCorée	/	67%	2005	[19]
Japon	/	91%	2005	[19]

Dans l'ensemble, il n'y a pas d'informations claires sur la quantité de déchets de verre dans le monde, en raison du manque des informations de différents pays comme le Moyen-Orient en tant qu'exemple [19].

I.3.3. Recyclage des déchets de verre en Algérie

Selon Karim Ouamane [35], Directeur général de l'Agence Nationale des déchets, l'Algérie produisait annuellement 34 millions de tonnes de déchets, M. Ouamane a également souligné qu'en 2019 seul un faible pourcentage, compris entre 7 et 10 % était recyclé et valorisé . Cette quantité de déchets non récupérée actuellement représente une valeur marchande estimée à 40 milliards de dinars algériens (DA) et peut également créer 100.000 emplois dont 40.000 emplois directs, a-t-il fait savoir.

Selon le représentant du Centre national du registre de commerce (CNRC), près de 10.000 entreprises activent dans le domaine de la protection de l'environnement, dont des entreprises spécialisées dans le recyclage des déchets de verre, de plastique et de carton, à travers tout le territoire national.

I.3.4. Effet du verre sur l'ouvrabilité et le Temps de prise

Yixin Shao et al. [36] ont étudié l'effet de la taille des particules de verre (le verre de récupération des lampes fluorescentes) sur les propriétés de ciment et béton en utilisant 30% de déchets de verre en remplacement partiel du ciment dans le mélange de béton, avec des tailles 150 µm, 75 µm et 38 µm, l'étalement d'un béton diminue avec l'ajout de poudre de verre pour une taille des particules qui varie entre 38 et 150 µm, en raison de la forme angulaire des particules de verre.

Metwally et al. [37] ont aussi travaillé sur le verre des lampes comme substituant au ciment avec différentes proportions 0, 5, 10, 15, 20%. Les poudres sont tamisées à travers des tamis de 45 µm, dont la finesse de 6500 cm^2/g et le rapport E/C de 0,47.

La figure 1.7 montre une grande réduction d'affaissement (perte de maniabilité) lorsque l'on augmente la quantité de FMWG (Finely milled waste glass) de 0% à 20%. Par exemple, M1 (5% FMWG) a une perte d'affaissement de 4% et M4 (20% FMWG) une perte de 45% par rapport au mélange de contrôle M0 (100% ciment) qui n'a pas de FMWG. La réduction d'affaissement est due à la présence des particules très fines et la grande surface spécifique de FMWG (6500 cm^2/g).

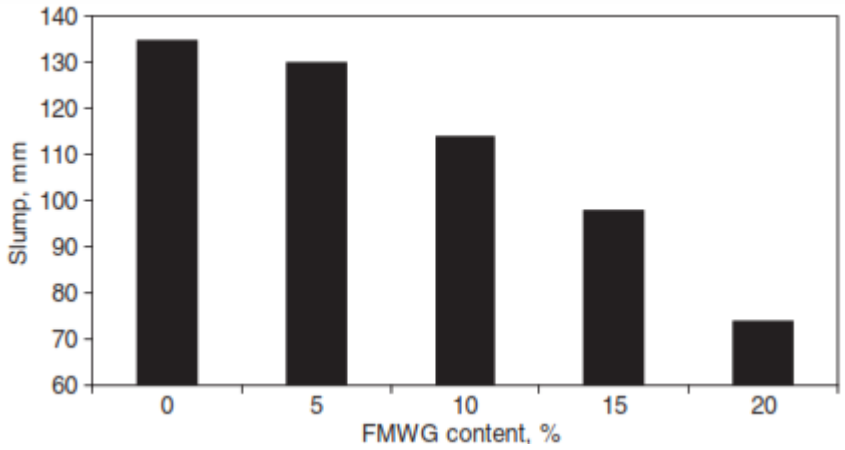


Figure I.7 : Effet de FMWG sur l'affaissement de béton [37].

Shayan et al. [38] ont mené des études sur une dizaine de mélanges de béton de rapport E/L=0,49, dont trois incorporant 0, 20 et 30 % de la poudre de verre en substitution partielle du ciment et désignés respectivement par Mix1, Mix3 et Mix4 . Les surfaces spécifiques Blaine des matériaux utilisés sont de 3500 cm^2/g et 8000 cm^2/g respectivement pour le ciment et la poudre de verre. Les résultats de l'affaissement exprimés dans le tableau 1.2 montrent que la poudre de verre réduit l'ouvrabilité des mélanges. Ceci serait lié à sa surface spécifique très élevée, plus que le double de celle du ciment utilisé.

Tableau I.2 : Affaissement des bétons pour E/L =0,49 [38]

Mélanges	**Témoin**	**20% Poudre de verre**	**30%Poudre de verre**
Affaissement (mm)	70	65	60

Par contre Schwarz et al. [39] ont trouvé de leur côté une augmentation de l'étalement des pates lorsque le taux de substitution par la poudre de verre (de finesse Blaine égale à 2620 cm^2 /g) augmente. En effet, ils ont exprimé l'étalement relatif par le rapport des étalements des mélanges de poudres de verre sur celui du témoin et ont obtenu les résultats montrés sur la figure I.8.

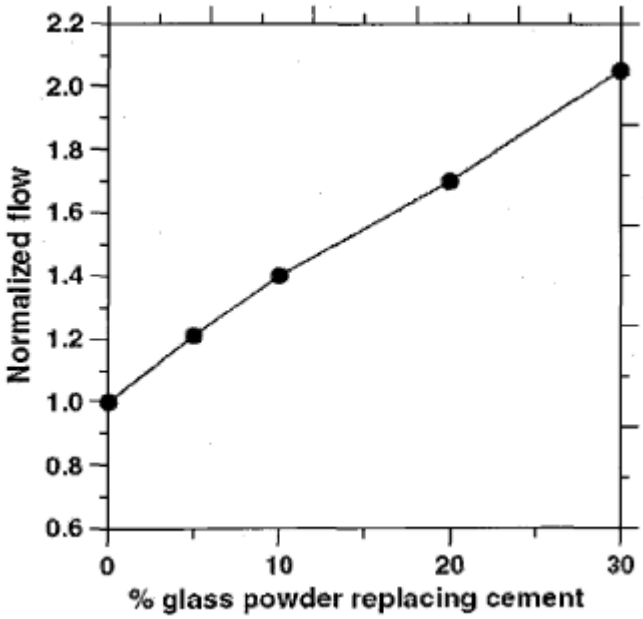


Figure I.8 : Effet de la poudre de verre sur l'étalement relatif des pates par rapport au témoin [39].

Dans une autre étude, Schwarz et al.[40] ont révélé que la poudre de verre augmente l'affaissement du béton et diminue la teneur en air par rapport au béton témoin pour un rapport E/L= 0,40. En effet, ils ont effectué une comparaison des effets de la poudre de verres broyés et des cendres volantes sur les propriétés des bétons incorporant 10 % de ces ajouts. Les résultats de l'affaissement et de la teneur en air des mélanges sont présentés sur le tableau 1.3. Le dosage en adjuvants chimiques (réducteur d'eau ou AEA) est identique pour tous les mélanges.

Tableau I.3 : Affaissement et teneur en air des bétons[40].

Mélanges	Témoin	10%Poudre de verre	10%Cendres volantes
Affaissement (mm)	178	215	215
Teneur en air (%)	8	7.5	6.8

Nassar et al. [41] ont mené une étude sur du béton incorporant de déchets du verre de bouteilles broyé est utilisé dans déférents pourcentages 15, 20 et 23% en remplacement partiel de ciment avec des tailles de particules moyenne de 25µm, une surface spécifique de 4280 cm^2/g et un rapport E/C=0,45. Les résultats du test d'affaissement indiquent que les mélanges de béton de verre recyclé ont une ouvrabilité légèrement inférieure (à l'exception le mélange de béton avec 15% de remplacement du ciment avec des déchets de verre broyé) cette tendance peut être attribués à la géométrie brute et non sphérique des particules de verre.

Nassar et al. [42] ont fait une autre recherche sur l'utilisation de déchets de verre de couleur mélangés broyés, avec 20% de remplacement partiel de ciment, d'une finesse de 4925 cm^2/g avec deux rapports E/C, 0,36 et 0,5 dans de béton à agrégats recyclés. Les particules de verre broyé entraînent un meilleur arrangement de particules, formant une microstructure plus dense et donc moins perméable en plus de l'augmentation de la maniabilité pour les mélanges de béton frais à 20% de déchets de verre.

Mafalda et al. [43] ont trouvé de leur côté une augmentation de la maniabilité des mortiers avec le remplacement de ciment par la poudre de verre dont les pourcentages sont :10 et 20% avec une finesse similaire à celles de ciment.

Kumarappan [44] a montré qu'il existe une augmentation de l'affaissement à mesure que la poudre de verre dans le mélange augmente.

D'autres essais menés par Berraih et al. [45] sur des mortiers incorporant des déchets de verre de bouteilles broyées et tamisées à travers un tamis de 0.08 mm, et utilisés avec les pourcentages 5%, 10% et 20%. La surface spécifique Blaine de la poudre de verre, est SSB = 3060 cm^2/g et le rapport E/C=0,5. Pour l'essai de consistance et de prise, ils remarquent que l'ajout de poudre du verre diminue légèrement la demande en eau, seulement les résultats restent très proches. La poudre de verre retarde la prise de la pâte avec une légère différence. (Tableau 1.4)

Tableau I.4 : Consistance et prise de quelques mortiers confectionnés [45] .

Désignation des mortiers	Poudre de verre (%)	Consistance (E/L) (%)	Début de prise (h :mn)	Fin de prise (h :mm)
C	0	25	2 :25	3 :50
V20	20	24	2 :45	4 :20

Les résultats des essais de maniabilité sur mortiers frais montrent qu'avec une quantité d'eau constante (E/L=0.5), le mortier de ciment Portland sans ajout présente une maniabilité égale à celle du mortier V10 et légèrement inférieur au mortier V20 (20% de poudre de verre).

Tableau I.5 : Résultat de la maniabilité de déférents mortiers confectionnés [45].

Désignation des mortiers	Poudre de verre (%)	E/L	Etalement (%)
C	0	0.5	19%
V5	5	0.5	18%
V10	10	0.5	19%
V20	20	0.5	21%

D'autres recherches menées par Islam et al. [46] sur des bétons incorporant des déchets de verre utilisés pour remplacer le ciment dont cinq compositions 0, 10, 15, 20, 25% avec un rapport E/C=0,5. Ils ont trouvé une légère augmentation de l'étalement comme indiqué dans la figure I.9.

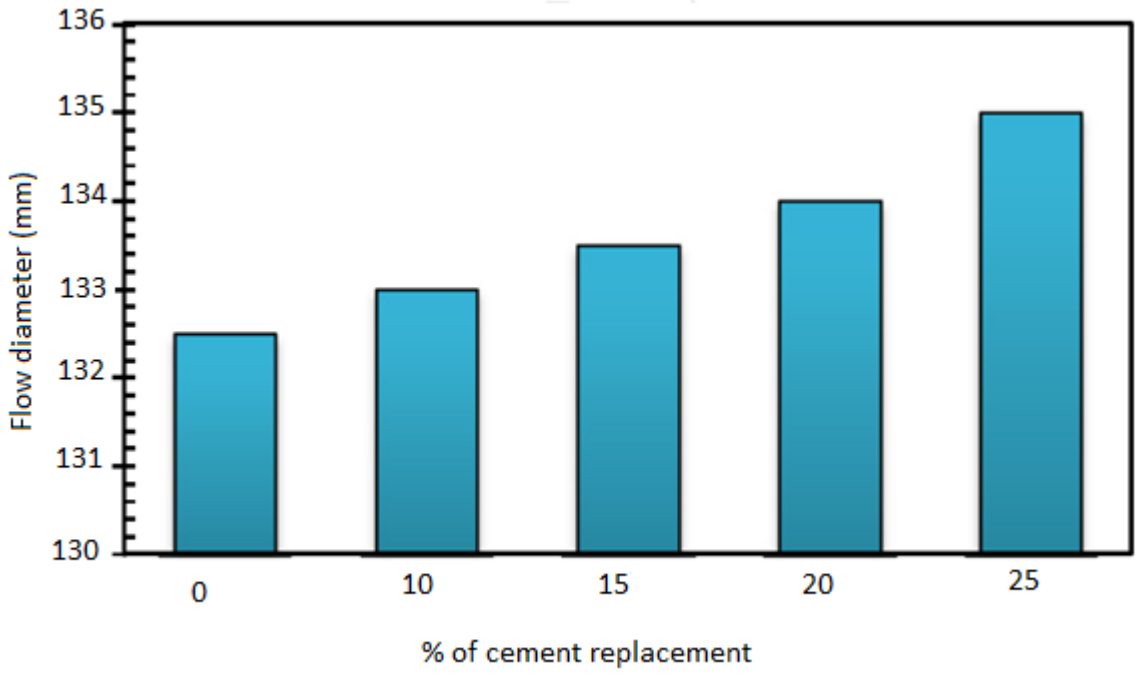


Figure I.9 : Effet de la PV sur l'affaissement de béton [46].

Olofinnade et al. [20] ont remarqué que la poudre de verre tamisé à travers des ouvertures de tamis de 0,075 mm et utilisée comme remplacement partiel de ciment à différents pourcentages 0, 15, 18, 21, 24, 27, 30% avec un rapport E/L =0,5 diminue l'ouvrabilité des bétons confectionnés. Les mêmes résultats ont été trouvés par [Metwally et al. [37] et Schayan et al. [38]].

Les résultats montrent clairement que la valeur d'affaissement a été maintenue à peu près constante entre 15% et 21% de remplacement du ciment, mais légèrement inférieure au témoin. La légère différence est d'environ 5% par rapport à la valeur d'affaissement initiale de 40 mm enregistrées pour le témoin à un rapport eau / liant constant. Cependant, une réduction significative de l'affaissement a été enregistrée avec un remplacement de 24% à 30% du ciment par de la poudre de verre broyé. Une diminution d'environ 30% de la valeur d'affaissement a été observée lorsque la teneur en poudre de verre est passée de 24% à 30% de remplacement du ciment (figure 1.10).

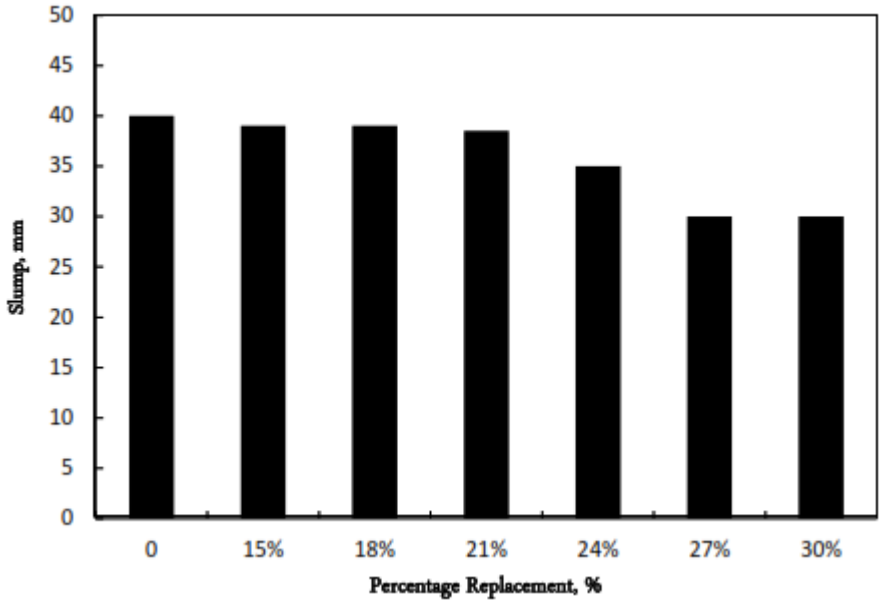


Figure I.10 : Valeur d'affaissement en fonction de % de remplacement [20].

Les recherches effectuées par Mayur et al. [47] sur l'incorporation de la poudre de verre en remplacement partiel de ciment dans des pourcentages de 0, 5, 10, 15% avec une finesse qui n'a pas été mentionnée, et des rapports E/P (poudres) égaux à 0,42-0,46-0,48 , montrent que l'ajout de la poudre du verre dans les mélanges BAP réduit les caractéristiques d'auto-compactibilité comme capacité de remplissage, capacité de passage et la résistance à la ségrégation, mais elle a montré une plus grande réactivité pouzzolanique que les cendres volantes de classe F. De plus, la surface d'écoulement relative est réduite avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre, ce qui est un indicateur d'une diminution de la déformabilité du mélange.

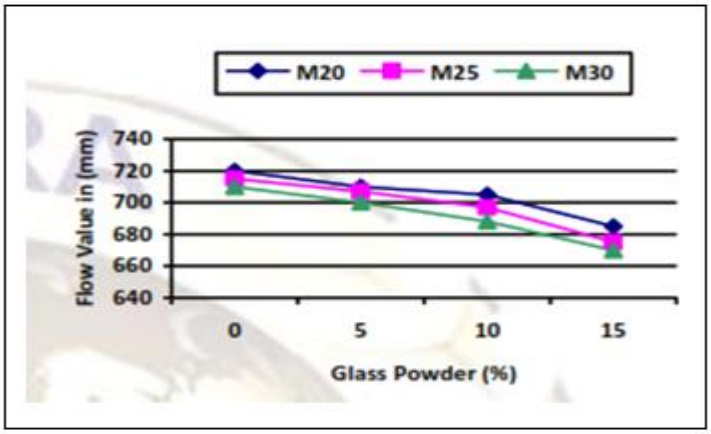


Figure I.11 : Diamètre de l'étalement avec déférent % de poudre de verre [47].

Le temps V-entonnoir, qui représentent la capacité de remplissage du mélange ; a observé une augmentation moyenne de 6,21%, 15% et 22,54% pour des teneurs en poudre de verre de 5%, 10% et 15% respectivement, cette augmentation du temps de l'entonnoir en V indique des valeurs diminuées du temps d'écoulement relatives et donc une viscosité plus élevée (résistance à l'écoulement) pour les mélanges. Les valeurs de la boîte en L suivaient une tendance décroissante avec une variation moyenne de 1,5%, 3,2% et 5% pour des teneurs en poudre de verre de 5%, 10% et 15% respectivement.

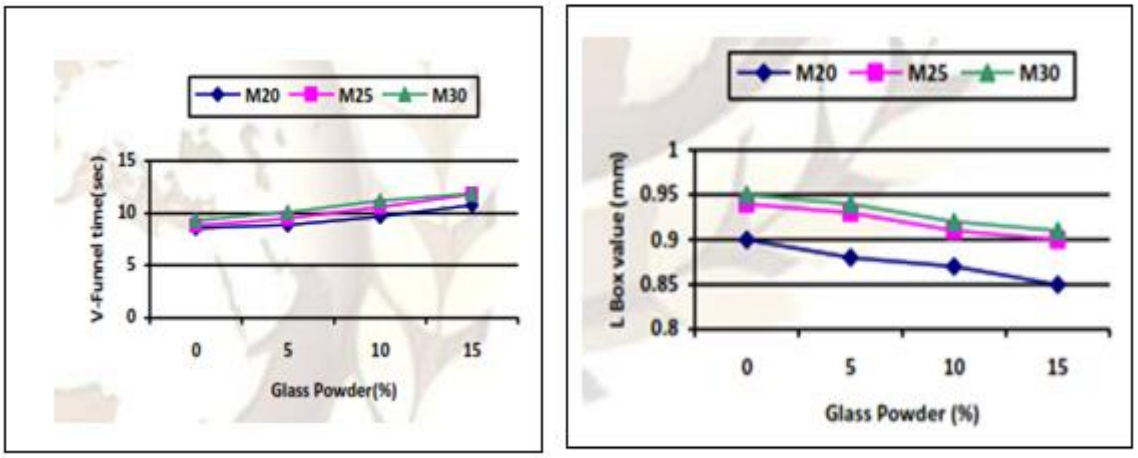


Figure I.12 : Le temps en V-Funnel en fonction de % de PV, L-Box en fonction de % de PV [47].

De même les travaux Öznur et al. [48] dont les résultats illustrés par la figure 1.13, montrent que l'utilisation de la poudre de verre affecte négativement l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants. La fluidité des SCMGP (self compacting mortar glass powder) diminuait à mesure que le volume de la poudre de verre dans les mélanges augmentait.

La figure 1.13 illustre la réduction de diamètre d'écoulement des mélanges avec la poudre de verre de 5%, 10%, 15% et 20%, avec le rapport eau / liant de 0,40 et une teneur totale en liant de 550 kg/m^3.

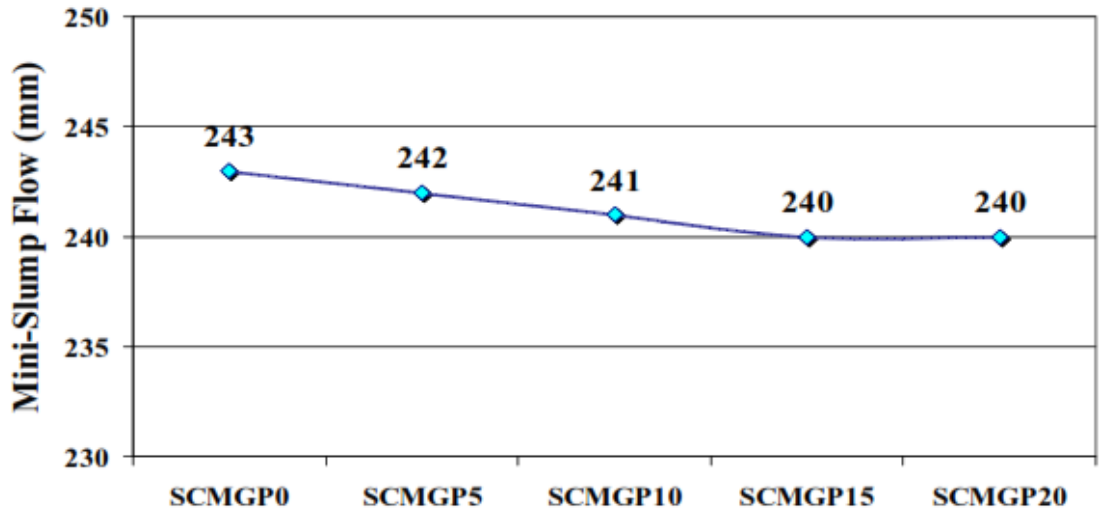


Figure I.13 : Diamètre d'étalement en fonction de % de PV [48].

Toutefois, le temps d'écoulement dans l'entonnoir mini-v augmentait progressivement avec l'augmentation de la quantité de poudre de verre utilisée dans les SCMGP. On peut conclure que la maniabilité des SCMGP s'est particulièrement détériorée avec l'utilisation de la poudre de verre.

Soliman et al. [49] ont partiellement remplacé le ciment dans des mélanges de béton à haute performance par la PV à des niveaux de 0, 10, 20, 30, 40 et 50% en poids. Les résultats indiquent également que l'inclusion de PV entraine une plus grande maniabilité en raison de sa capacité d'absorption d'eau négligeable et de sa surface lisse.

Arab et al. [50] ont effectué des essais sur le temps de prise pour des mortiers à hautes performances contenant de PV, les pourcentages de substitution par rapport poids de ciment étaient : 0 , 10 et 20%. Les résultats présentés dans la figure I.14 révèlent que les délais de prise sont légèrement augmentés avec l'augmentation de la teneur en PV. L'utilisation de la PV réduit habituellement la demande en eau.

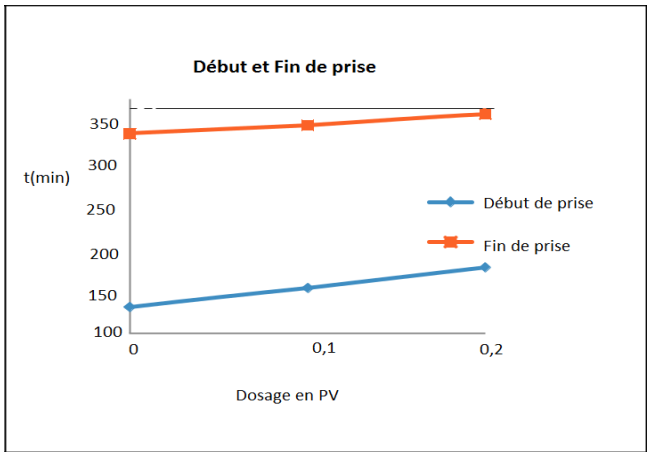


Figure I.14 : Résultats des mesures de consistance, et de temps de début et fin de prise des mélanges CPA + PV en fonction du % de PV [50].

Khatib et al. [51] ont trouvé que la substitution partielle du ciment dans les mélanges de béton ordinaire par la PV à des niveaux 0%, 10%, 20%, 30% et 40% en poids avec un rapport E/C de 0,5, augmente la maniabilité de béton (figure 1.15).

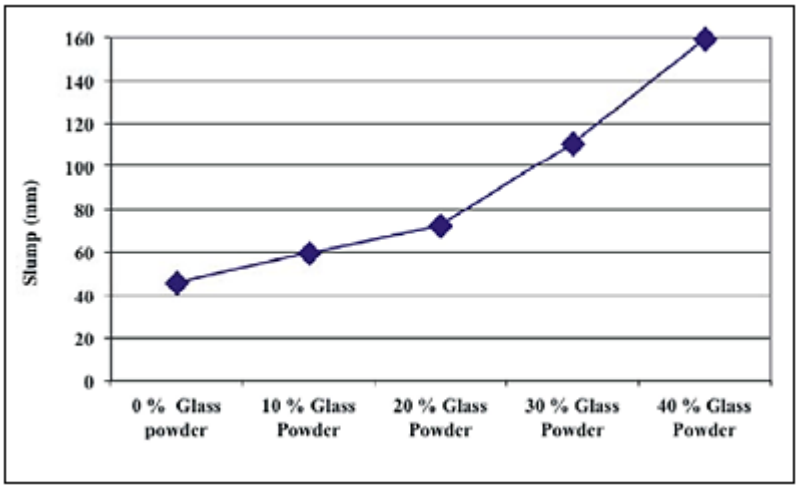


Figure I.15: Valeurs d'affaissement des bétons avec des quantités variables de la poudre de verre [51].

Lu et al. [52] ont montré que le remplacement de 20% de ciment par la poudre de verre dans des mélanges de béton a prolongé leur temps de prise initiale et finale. Cela peut être dû à la surface lisse et à l'absorption d'eau négligeable des particules de verre.

Vasudevanet al. [53] ont aussi prouvé que l'addition de la poudre de verre comme substitution de ciment améliore les propriétés à l'état frais de béton.

Zidol [54] a étudié l'effet de la poudre de verre PV sur les propriétés à l'état frai et durci des différents types de béton (ordinaire , haute performance , autoplaçant).

Le béton ordinaire est confectionné avec un rapport E/C =0.5, incorporés à différentes proportions du verre 0, 20, 30% dont deux finesses différentes désignées par 6*25 (3740 cm^2/g) et 9*25 (4360 cm^2/g).

L'affaissement mesuré à 10 min dans les mélanges avec poudres de verre est d'au moins 8 % supérieurs à celui du témoin. Ceci traduit une amélioration de l'ouvrabilité des mélanges en présence de la poudre de verre.

Les temps de prise de différents mélanges étudiés sont illustrés sur la figure I.16. Les temps de début et fin de prise des mélanges incorporant les poudres de verre sont tous légèrement supérieurs à celui du témoin.

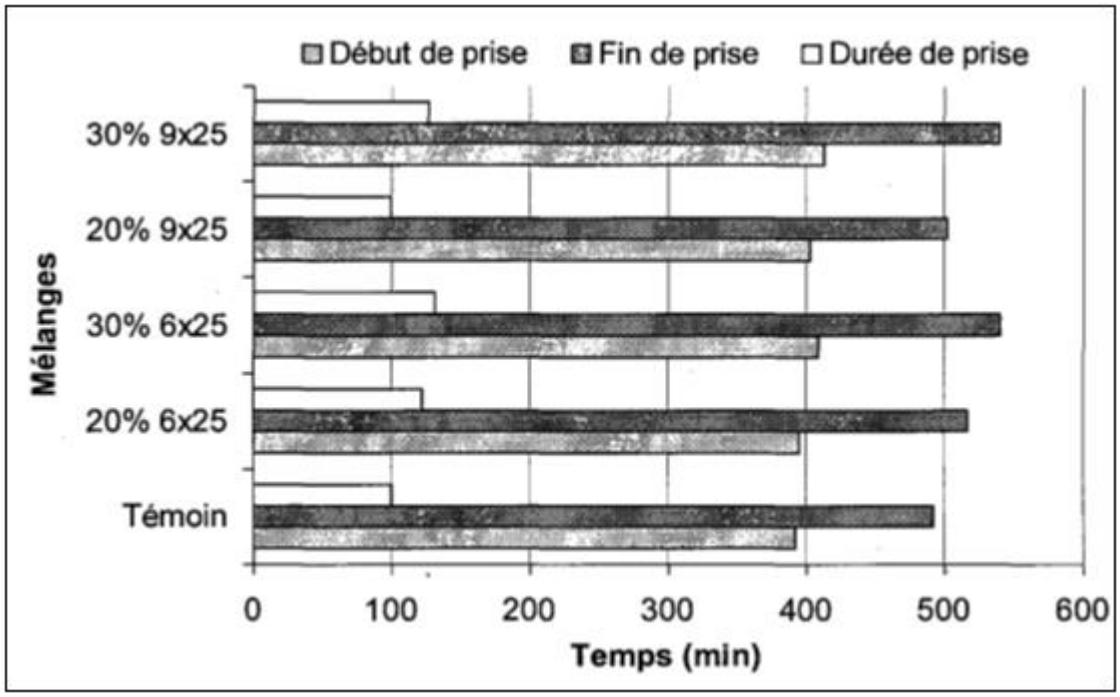


Figure I.16 : Temps de prise des bétons conventionnels [54].

Pour le béton à haute performance, des mélanges de béton incorporant 0, 20, 30% de PV, ont été préparés avec un rapport E/C=0,4. Les mélanges avec 20 et 30% de PV présentent des affaissements à 10 min similaires à celui du mélange témoin.

Les temps de prises initiales des mélanges avec 20% de poudres de verre sont similaires à celui du témoin et leurs temps de prise finale sont légèrement supérieurs à celui du témoin.

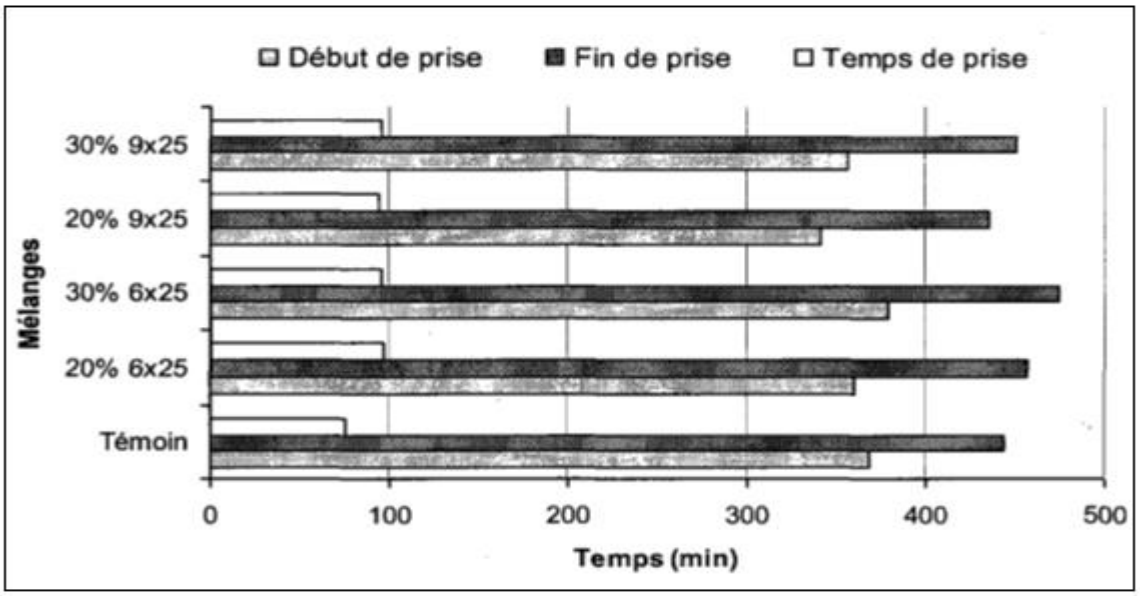


Figure I.17: Temps de prise des bétons à haute performance [54].

Pour mieux évaluer l'effet de la poudre de verre sur les propriétés rhéologiques, ils ont considéré le cas des bétons autoplaçant. Des mélanges incorporant 0, 20 et 30% de la poudre de verre 6*25 (3740 cm^2 /g) et un mélange contenant 20% des cendres volantes de classe F sont étudiés. Les étalements des mélanges incorporant la poudre de verre, malgré un dosage en superplastifiant légèrement plus faible, sont sensiblement similaires à ceux du témoin.

La poudre de verre favorise le maintien de la maniabilité des mélanges. La réduction de la demande en superplastifiant par la poudre de verre peut être liée à son absorption presque nulle et sa réactivité lente.

Les résultats de la rhéologie obtenus à l'aide du rhéomètre du type Tattersall MKIII, sont présentés dans le tableau I.6 :

Tableau I.6: Propriétés rhéologiques mesurées sur les BAP [54].

Mélanges	**Seuil de cisaillement au repos τ_0 repos (Pa)**	**Modèle de Bingham**	
		τ_0 (Pa)	**μ_{pl} (Pa.s)**
Témoin GU	434,0	88	140
20% CV	215,3	58	174
20% 6*25	283,1	59	146
30% 6*25	270,3	60	109

Le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité plastique μ_{pl} des mélanges avec la poudre de verre sont inferieurs respectivement d'environ 32 % et 21 % à ceux du témoin GU. Le mélange avec 20 % des cendres volantes présente un seuil de cisaillement identique à ceux des mélanges avec poudre de verre tandis que sa viscosité plastique est supérieure à celles de ces derniers et du témoin. Les cendres volantes semblent augmenter la viscosité plastique alors que la poudre de verre semble la diminuer. II a été également montré qu'une augmentation d'ouvrabilité engendre une diminution de la viscosité plastique [55].

Chekireb [56] a aussi travaillé sur différents mélanges de béton autoplaçant incorporant la poudre de verre dont différents pourcentages 0, 20, 30 et 40%, avec un rapport E/C fixe de 0,42 et comparé avec d'autres mélanges tels que les cendres volantes (20%), et le laitier (20%). Les surfaces spécifiques de Blaine des poudres de verre sont respectivement de 4400 cm² /g pour PV-1 et 6400 cm² /g pour PV-2 ; celui du ciment est de 3970 cm² /g.

Les résultats des essais sur des pâtes à matrice binaire ont montré que les mélanges avec PV-2 ont un meilleur étalement que ceux avec PV-1 pour tous les pourcentages de remplacement, Cela peut s'expliquer par le fait que PV-2 améliore la compacité granulaire des mélanges grâce à sa finesse qui est 1,6 fois supérieure à celle du mélange GU, elle a un effet filler en comblant les vides entre les grains de ciment, de ce fait il y a beaucoup plus d'eau libre pour lubrifier le mélange et augmenter ainsi la fluidité.

Pour le même dosage en superplastifiant (0,12 par exemple), l'étalement des coulis avec PV-1, PV-2, CV, et L est de 135 mm, 164 mm, 155 mm, et 145 mm respectivement. Ce résultat nous montre encore une fois que PV-2 offre une meilleure fluidité que PV-1, mais aussi que CV et L pour un même pourcentage de remplacement du ciment. Pour les mélanges 30 PV-1 et 40 PV-1 avec un dosage en SP de 0,18% et les mélanges de 30 PV-2 et 40 PV-2 avec un dosage en SP de 0,15%, il est à remarquer que l'étalement n'est pas uniforme en présence de ressuage et sédimentation des particules fines.

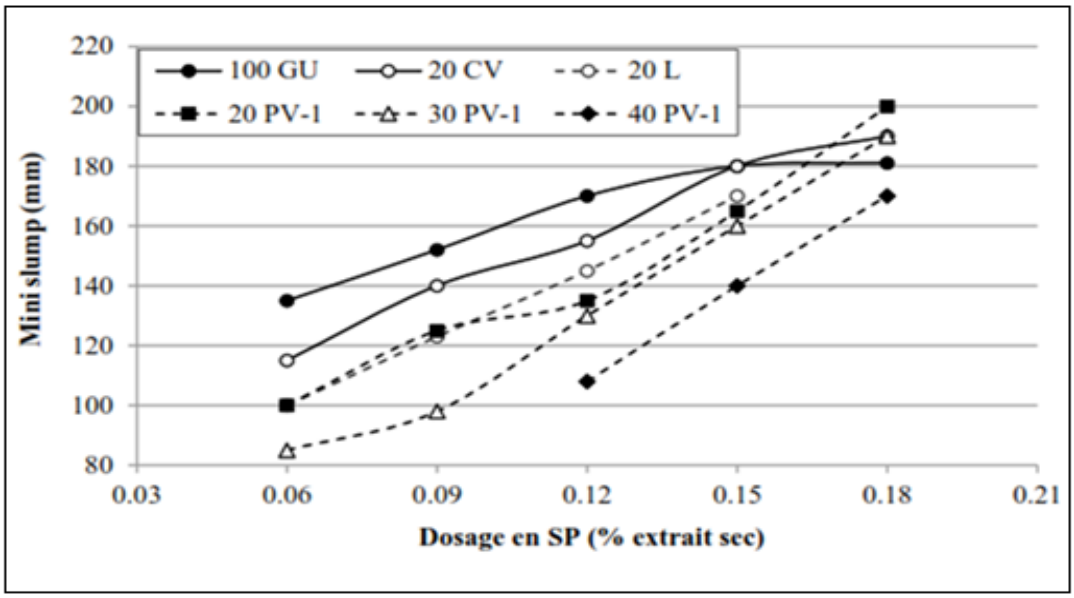


Figure I.18: Etalement des pâtes contenant PV-1 en fonction de dosage en SP à 5 min du contact eau-liant [56].

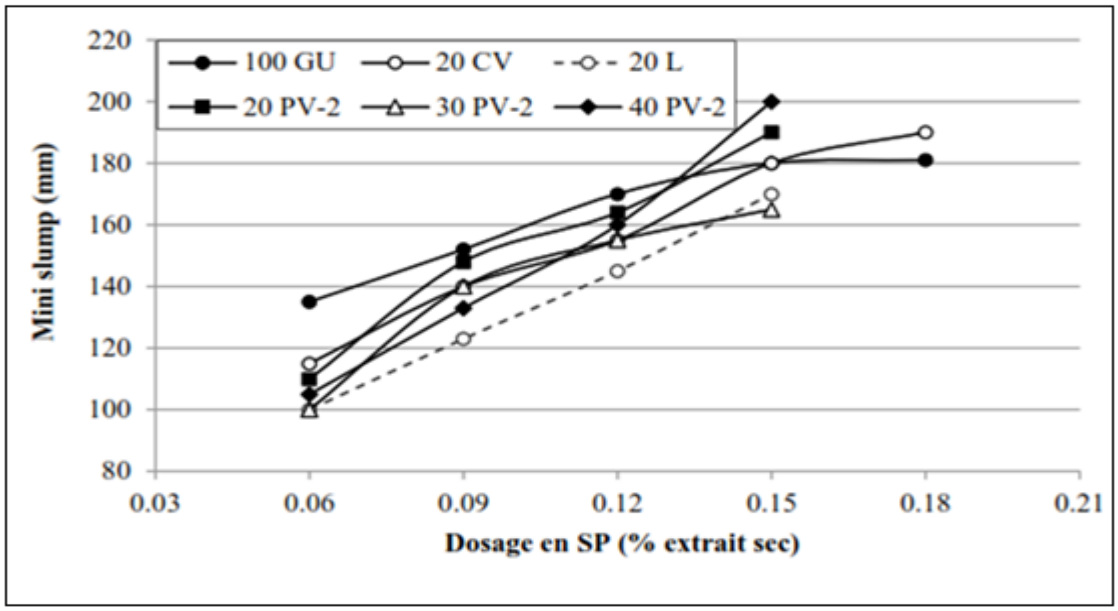


Figure I.19: Etalement des pâtes contenant PV-2 en fonction de dosage en SP à 5 min du contact eau-liant [56].

En résumé, le mélange PV-2 dont la finesse est de 640 m^2/kg améliore la fluidité des coulis en comparaison avec PV-1 indépendamment de sa teneur. Mais on ne peut pas dire que plus la finesse est élevée plus la rhéologie est améliorée.

En effet, les résultats de l'étude de Zidol [54] montrent qu'une finesse de 374 m^2/kg est suffisante pour améliorer la fluidité des pâtes de 9,3 % et 13,3 % pour un taux d'incorporation de 20 % et 30 % respectivement. Par ailleurs dans l'étude de Schayan et al.[38] l'incorporation d'une poudre de verre de 800 m^2/kg implique une diminution de l'affaissement des bétons de 8 % et 17 % pour un taux de PV de 20 % et 30 % respectivement (l'étude a été réalisée sur un béton ordinaire de rapport E/L = 0,49).

Cette divergence au niveau des résultats obtenus par ces chercheurs pourrait être attribuée à la différence de condition de travail, la différence de finesse Blaine et du rapport E/L.

I.3.5. Effet du verre sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers

I.3.5.1. Résistance à la compression

Shayan et al. [57] ont remplacé le ciment par la poudre de verre (PV) dans les proportions 0, 10, 20, 30, 40%, avec des tailles des particules <10 µm ,une finesse de 8000 cm^2/ g et un rapport eau / ciment de 0,47, les mélanges fabriqués avec du PV avaient moins de résistance à la compression à 28 jours en comparaison au béton témoin mais à 90 jours les résistances étaient toutefois supérieures ou similaires à celles de la référence.

La figure 1.20 montre que les résistances à la compression diminuent lorsque le taux de substitution par la poudre de verre augmente. Ces résistances sont inférieures au témoin à 28 jours mais assez similaires au témoin à 91 jours. La faible résistance à jeune âge pourrait être liée à la faible teneur en ciment qui occasionne une légère augmentation du rapport E/C effectif. [Shayan et al. [57] et Shayan et al. [38] déclarent aussi que le développement de résistance à la compression est lent jusqu'à 28 jours d'âge, mais à l'âge de 404 jours tous les mélanges développent des résistances de 55 MPa en moyenne, dépassant celle du témoin de 40 MPa. Ils ont rapporté à travers les résultats issus de leurs différents mélanges étudiés que la poudre de verre peut être incorporée aux taux de 20 et 30 % en remplacement du ciment dans les bétons sans effets négatifs sur ses propriétés.

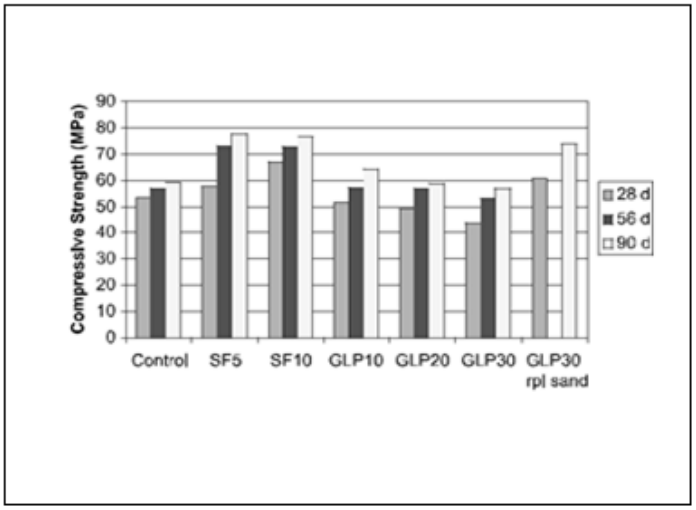


Figure I.20 : Résistances à la compression des mélanges de béton de poudre de verre et fumé de silice comparées au témoin [57].

De même, Taha et al. [58], Schwarz et al. (2007 et 2008b) [38,37] ont aussi remarqué une faible résistance à 28 jours dans des mélanges incorporant la poudre de verre. Ces résistances à 28 jours sont d'autant plus faibles que le taux de substitution par la poudre augmente (Figure 1.21).

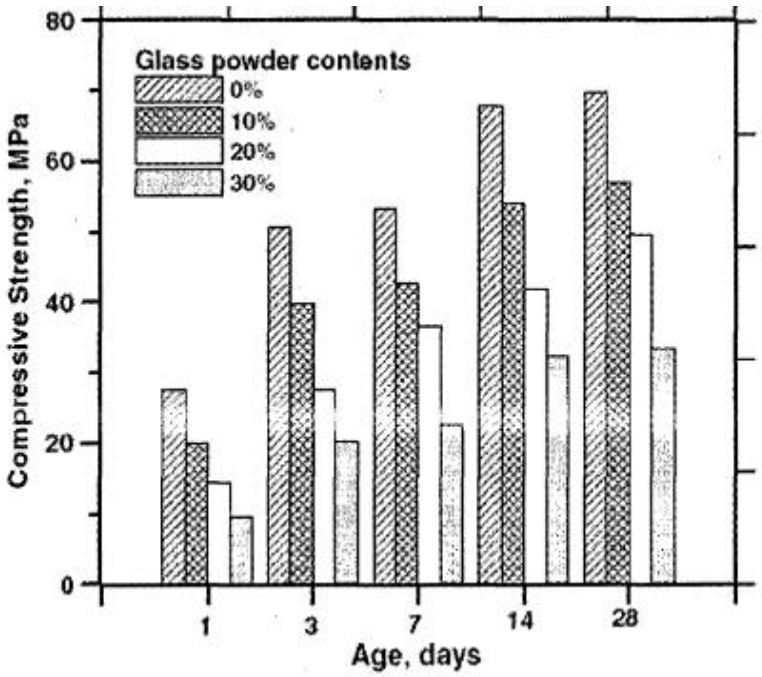


Figure I.21 : Résistance à la compression des bétons E/L=0 ,42 [39]**.**

Omer et al. [59] ont aussi remarqué que la résistance à la compression est généralement réduite à mesure que la valeur de remplacement augmente. Les valeurs maximales de résistance à la compression sont mesurées à un niveau de remplacement de 10% pour les 7ème et 28ème jour. La valeur maximale atteinte dans les groupes de 7 jours était de 36,84 MPa, soit 10,7% de plus que la valeur de référence. La valeur maximale atteinte dans les groupes de 28 jours était de 47,56 MPa, soit seulement 3,8% de plus que la valeur de référence à 28 jours. Des augmentations de la résistance ont été obtenues à 10% et des diminutions de résistance ont été observées à des niveaux de remplacement de 30%.

Nassar et al. [41] ont étudié la substitution partielle du ciment dans les mélanges de béton par la PV à des niveaux de 15, 20 et 23%, avec une finesse de 4280 cm^2/g et un rapport E/C de 0,45. Les résultats montrent que les bétons contenant 15% et 20% de la poudre de verre offrent des résistances à la compression moyennes supérieures, à celui du béton de contrôle à 90 jours, tandis que la résistance à la compression avec 23% de PV était inférieure à celui du béton témoin à 90 jours. À 270 jours, le béton avec 15% et 20% du PV présentait des résistances à la compression moyennes supérieures à celles du béton témoin, la résistance à la compression moyenne avec 23% de PV était comparable à celle du béton de référence (figure 1.22).

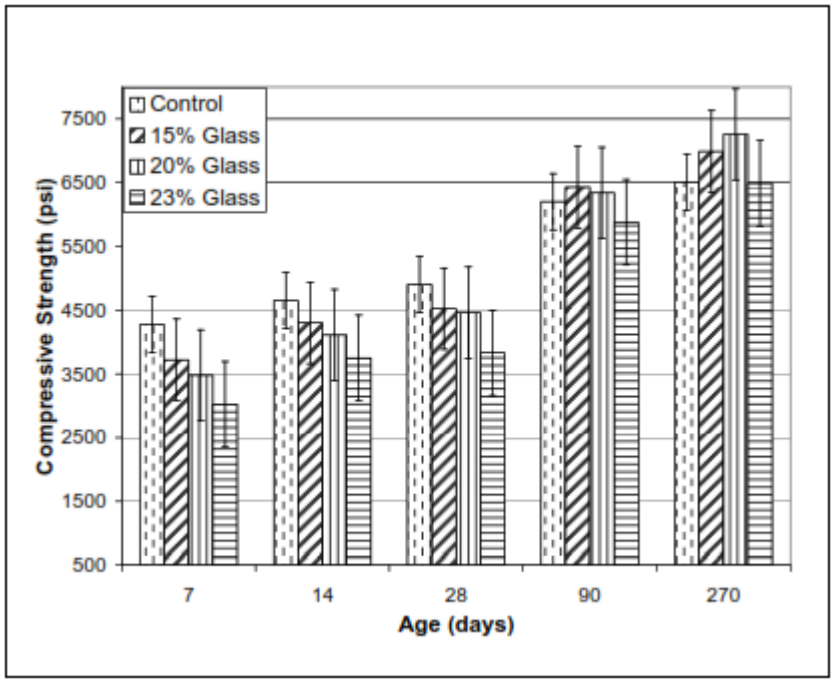


Figure I.22 : Résistance à la compression à différents âges [41].

Nassar et al. [42] ont fait une autre recherche sur l'utilisation de déchets de verre de couleur mélangés broyés, dont 20% de remplacement partiel de ciment, a une finesse de 4925 cm²/g et deux rapports E/C 0,36 et 0,5 dans de béton avec agrégats recyclés. Les résistances moyennes à la compression sont comparables à celle de béton témoin (sans verre) à l'âge de 28 jours. À 90, 156 et 300 jours, les résistances des bétons de verre recyclé sont plus élevées que celle de béton de contrôle correspondant à différents rapports E/C.

Khmiri et al. [60] ont traité l'activité pouzzolanique des déchets de verre finement broyés, lorsqu'ils les ont utilisé comme remplacements partiels de ciment dans les mortiers. Quatre classes différentes A1=100µm, 80µm, A2=80µm, 40µm, A3=40µm, A4=20µm et un seul pourcentage 20% sont utilisés. Les résultats indiquent que les déchets de verre améliorent les propriétés du béton lorsque 20% des déchets de verre de 20 µm sont utilisées en remplacement partiel du ciment.

La recherche menée par Omran et al. [61] inclut la caractérisation complète des mélanges de béton avec 10%, 20%, 30% de poudre du verre (PV) utilisé pour couler divers éléments structuraux (dalles, trottoirs et murs) exposés à différentes conditions environnementales (intérieur et extérieur). Le béton fabriqué avec 20% de PV a montré une augmentation de la résistance à la compression de (7%) à 91 jours, par rapport à celle de référence sans PV.

Olofinnade et al. [20] ont enregistré l'influence de la PV sur les propriétés mécaniques et durabilité des bétons. La poudre de verre a été utilisé comme ajouts cimentaires à des taux de 0, 15, 18, 21, 24, 27% en poids, avec un rapport E/C fixe de 0,5.

Les résultats indiquent que tous les bétons contenant du verre en poudre montrent une amélioration considérable de la résistance à la compression à 28 jours par rapport au témoin en raison de la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre. Cependant, à 28 jours, une amélioration significative de la résistance à la compression a été observée à 21% de remplacement, suivie d'une baisse progressive de la résistance. Par conséquent, le remplacement de ciment à 20% peut être adopté comme niveau de dosage optimal (figure I.23).

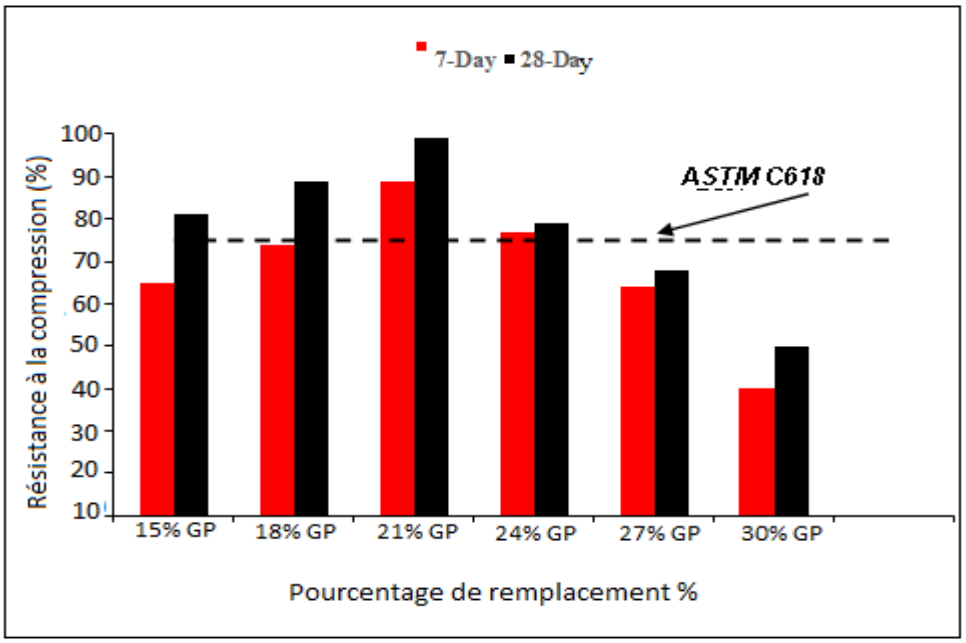


Figure I.23 : Résistance à la compression en fonction de % de remplacement de poudre de verre [20].

En outre Arab et al. [50] ont étudié le remplacement partiel du ciment dans des mortiers à hautes performances avec de la poudre de verre (verre de bouteilles verte et blanche) à des niveaux de 0, 10, 20% en poids, avec un rapport E/L=0,35 et une finesse de 3600 cm^2 /g .La PV entraine un développement lent de la résistance à 28 jours qui est plus faible que celle de témoin sans PV. En revanche à 90 jours de prise, ils observent que l'addition de 10 et 20% de PV améliore la résistance à la compression (figure I.24).

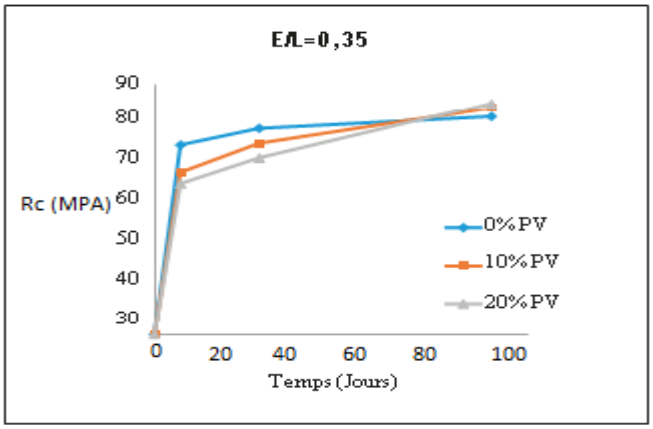


Figure I.24 : Évolution de la résistance en compression dans le temps en fonction du dosage de la poudre de verre [50].

Siad et al. [62] ont enregistré d'après leur recherche que la résistance à la compression des bétons contenants des poudres de verre de bouteille comme remplacement partiel de ciment à des niveaux de 0, 15, 30 et 45% en poids, répond ou dépasse celle du témoin (figure I.25).

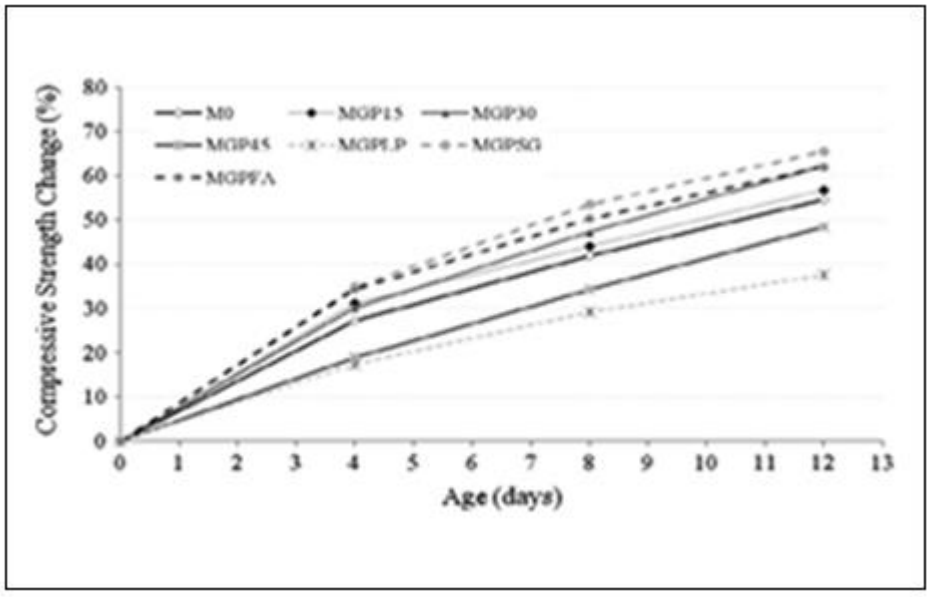


Fig. I.25 :Développement de la résistance à la compression avec différents % de poudre de verre [62].

Metwally et al . [37] ont remplacé le ciment par la PV (verre de lampe), dans les bétons en utilisant des taux de 0, 5, 10, 15 et 20% en poids, avec un rapport E/C= 0,47 et une finesse de 6500 cm^2 /g . les résultats montrent que 10% de PV donne la résistance à la compression la plus élevée (figure I.26).

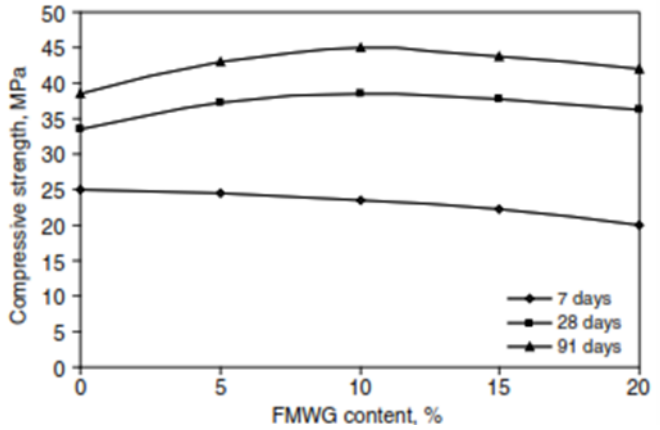


Figure I.26 : Effet de FMWG sur la résistance à la compression de béton [37].

Roy et al. [21] ont évalué l'accélération du développement précoce de la résistance du béton autoplaçant à l'aide de PV comme ajout cimentaire. Le ciment est remplacé à des niveaux de 0, 5, 10, 15%, avec un rapport E/C fixé de 0,4. La résistance à la compression à 28 jours indique que 15% de PV donne la résistance à la compression la plus élevée.

Soliman et al. [49] ont étudié l'effet de PV sur les propriétés à l'état frais et durci du béton. Le ciment est remplacé à des niveaux de 0, 10, 20 , 30, 40 et 50% en poids. Les résultats trouvés montrent que 20% de PV est la composition optimale qui donne la résistance la plus élevée (figure I.27).

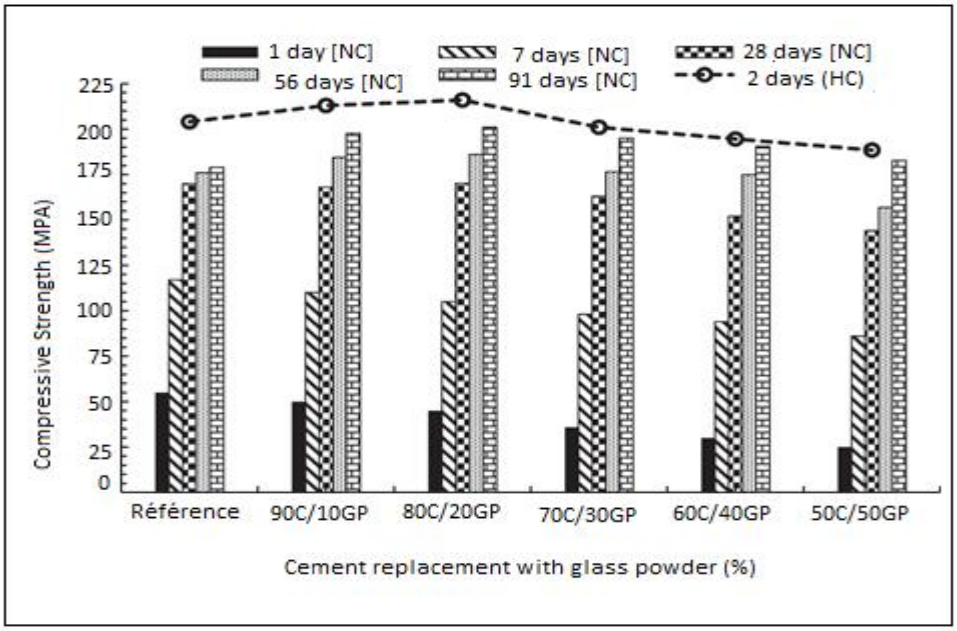


Figure I.27: Effet du remplacement du ciment par la poudre de verre sur la résistance à la compression à différents âges après durcissement normal (NC) et durcissement à chaud (HC) [49].

Islam et al. [46] ont formulé des mortiers avec différents pourcentages de PV 0, 10, 15, 20, 25% avec un rapport E/C fixé à 0,485. Les résultats montrent que la résistance à la compression de tous les mélanges (Ciment+PV) est supérieure à celle du mortier de contrôle à 90 jours sauf pour le 25% d'ajout de verre, le niveau de remplacement du ciment à 10% donnait la plus grande résistance à la compression à 90 jours. À 180 jours, le 15% présente la plus grande résistance à la compression dans les mortiers avec poudre du verre. De plus, à 365 jours le 20% de PV a donné une résistance à la compression maximale, soit 8% de plus que le mortier de contrôle sans verre (figure I.28).

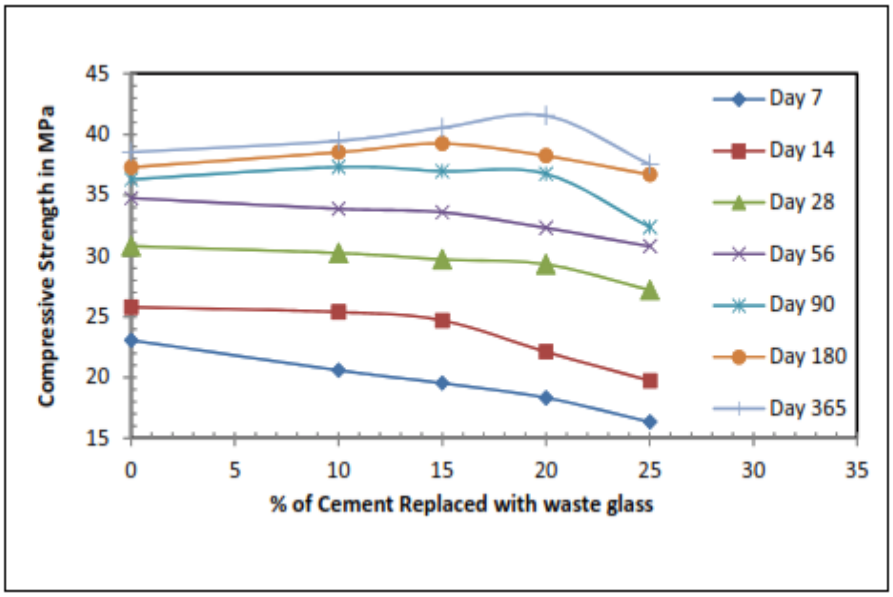


Figure I.28: Résistance à la compression des mortiers [46].

Berraih et al. [45] ont examiné l'utilisation des déchets de bouteilles de verre comme substituant partiel au ciment dans le mortier. Le ciment était remplacé par la PV à des niveaux 0, 5, 10, 20% en poids. La surface spécifique Blaine de la poudre de verre est 3060 cm^2 /g . Un rapport E/L fixe de 0,5 a été utilisé. Les résultats ont indiqué que 10% est le remplacement optimal qui a donné la résistance à la compression la plus élevée à court et à long terme. Kupolati et al. [63] ont enregistré les mêmes résultats, avec une augmentation de 14% de la résistance pour le 10% de PV par rapport au mélange témoin.

Dhirendra et al. [64] et Sandeep et al. [65] ont trouvé que la résistance en compression augmente jusqu'à 15% de remplacement , au-delà, elle diminue.

Patil et al. [66] ont étudié l'effet de la taille des particules de poudre de verre allant de 150µm à 90µm. Les résultats ont montré que la résistance à la compression à 7j est inférieure à celle du témoin mais elle augmente à 28 jours. L'addition de 20% de la poudre de verre donne la résistance à la compression la plus élvée. Ils montrent aussi qu'une taille inférieure à 90µm est très efficace dans l'amélioration de la résistance.

Wang et al. [67] ont réalisé une étude sur les propriétés de résistance des mortiers de ciment avec poudre de verre (PV) à des températures élevées . Les tests ont montré que 10% de la PV présente la résistance à la compression la plus élevée à 28 jours en particulier lorsque le verre ajouté a une finesse de poudre ≥ 4500 cm^2 /g.

I.3.5.2. Résistance à la traction-flexion

Vijayakumar et al. [68] ont examiné la résistance à la traction du béton contenant 10%, 20%, 30% et 40% de la poudre de verre. La résistance à la traction a été mesurée à 28 et 60 jours. Les résultats ont montré que le remplacement du ciment par 40% de poudre de verre augmente la résistance à la traction de 4,4%. Alors qu'avec des taux de 20%, 30% et 40% l'augmentation de la résistance à la flexion est de 83,07%, 99,07% et 100% respectivement.

Kushartomo et al. [69] ont étudié l'effet de la poudre de verre sur les résistance à la traction et à la flexion de béton en poudre réactif (PRC).

La poudre de quartz de béton en poudre réactif (PRC) a été remplacée par la poudre de verre à des niveaux de 10%, 20% et 30% de la masse de ciment. Les résultats ont montré que la valeur maximale de la résistance à la flexion est de 23,2 MPa pour 20% de PV remplacée. Pour la résistance à la traction la valeur maximale est de 17,8 MPA pour 20% de PV remplacée.

Kanstantin et al . [70] ont produit des éco-ciment avec quatre différents types de verre (vert à vitre (vitre d'écran noir, blanc et marron), verre de moniteur,verre de bouteille brune, verre de bouteille verte . 50% en poids de ciment par des déchets du verre ont été utilisés pour produire ces éco-ciment. Les résultats de test de la résistance à la flexion à 28 jours sont situés dans une plage relativement étroite de 6,9-7,3 MPa. Ces valeurs étaient légèrement supérieurs à la résistance à la flexion à 28 jours du temoin (6,7 Mpa).

Dali et al. [71] ont étudié les propriétés du béton contenant des adjuvants minéraux, lorsqu'il est soumis à un mouillage et un séchage alternatifs et à une température élevée. Les résultats ont montré que 20% de remplacement de la PV donne une résistance à la flexion la plus élevée dans les deux cas ou le béton n'est pas soumis à un mouillage et un séchage alternatifs et lorsque le béton est soumis à un mouillage et un séchage alternatifs. 20% de remplacement présente ainsi l'optimum pour la résistance à la traction.

Jangid et al. [72] ont trouvé que la résistance à la flexion augmente jusqu'à 35% de remplacement du ciment par de la poudre de verre. L'optimum est à 20% de remplacement au-delà duquel la résistance diminue.

Abdullah et al . [73] ont étudié l'effet de la PV sur la résistance à la traction et la résistance à la flexion des bétons. Le ciment a été remplacé par la PV à des niveaux de 0% à 50% par un pas de 5 en poids. Les résultats ont montré que l'inclusion de 10% de PV a présenté les résistances à la traction et à la flexion les plus élevées. L'amélioration à 28 jours de la résistance à la traction était de 7,16% et la résistance à la flexion était de 6,57%.

Chikhalikar et al. [74] ont testé la résistance à la flexion des bétons avec poudre de verre et ont trouvé qu'un dosage de 20% donne l'optimal. Le même résultat a été trouvé pour la résistance à la traction.

Vandhiyan et al. [75] ont montré qu'une amélioration considérable de la résistance à la flexion a été observée à 10% de remplacement du ciment.

I.3.5.3. Densité

Nassar et al. [75] rapportant l'augmentation de la densité apparente (à sec) et la densité apparente (après immersion) des mélanges avec 20% de la poudre de verre comme substituant du ciment.

I.3.5.4. Module d'élasticité

Zidol [54] A montré que le béton autoplaçant avec 30% de poudre de verre présente des modules 1,04 fois plus grand que celui du témoin. Ces résultats montrent une très légère amélioration en présence de la poudre de. Pour les bétons ordinaires les modules d'élasticité sont similaires à celui du témoin, sauf pour le mélange avec 30% PV avec une finesse 4360 cm^2/g qui présente un module d'élasticité supérieur d'au moins 7% à celui du témoin.

I.3.6. Effet de la poudre de verre sur la durabilité des bétons

I.3.6.1. Absorption d'eau

L'absorption d'eau par du béton est observée dans les deux cas : la porosité effective et la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

La figure I.29 montre que le taux d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du contenu de PV dans le mortier, le taux d'absorption d'eau est inférieur à celle de l'échantillon témoin.

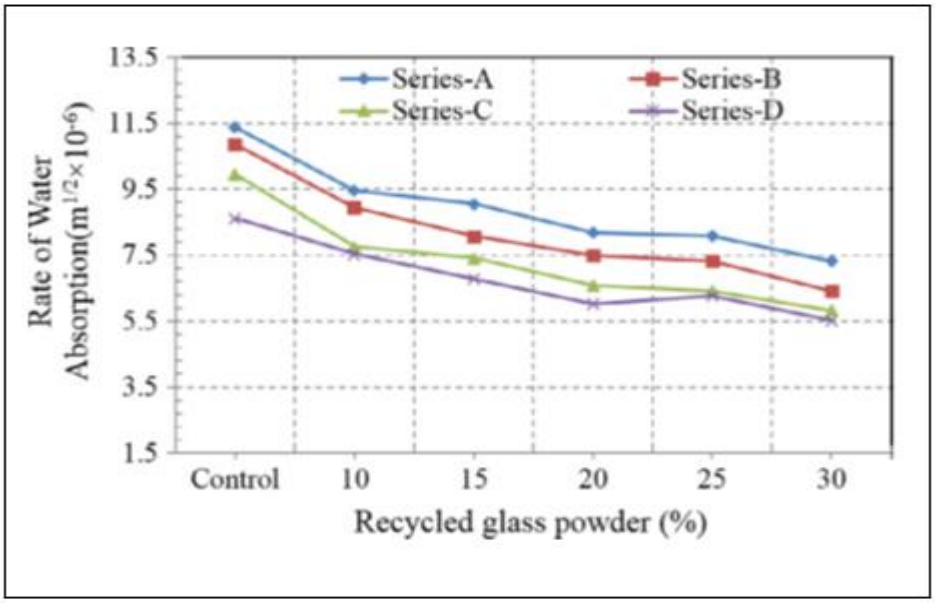


Figure I.29: Taux d'absorption d'eau du mortier en poudre de verre recyclé après 28 jours de durcissement [77].

Sébastien et al. [78] ont réalisé une étude sur l'effet de l'incorporation de la poudre de verre sur la durabilité des mortiers. Pour cette étude le ciment a été remplacé par la poudre de verre avec des teneurs de 0%, 15% et 30%. Les résultats montrent une réduction du pourcentage d'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en verre.

Paki et al. [79] ont étudié également le comportement de blocs de maçonnerie avec de la poudre de verre dans des proportions de 25%, 50% et 75% du poids de ciment. Les résultats ont enregistré une diminution de l'absorption d'eau des blocs de maçonnerie avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre.

Comme montre la figure I.30, l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de pourcentage de PV, la réduction de l'absorption d'eau était de 5% pour le mortier avec GP75 et GP 63 respectivement au niveau de substitution de 5%, et de 30 et 34% pour le niveau de substitution de 20% [80].

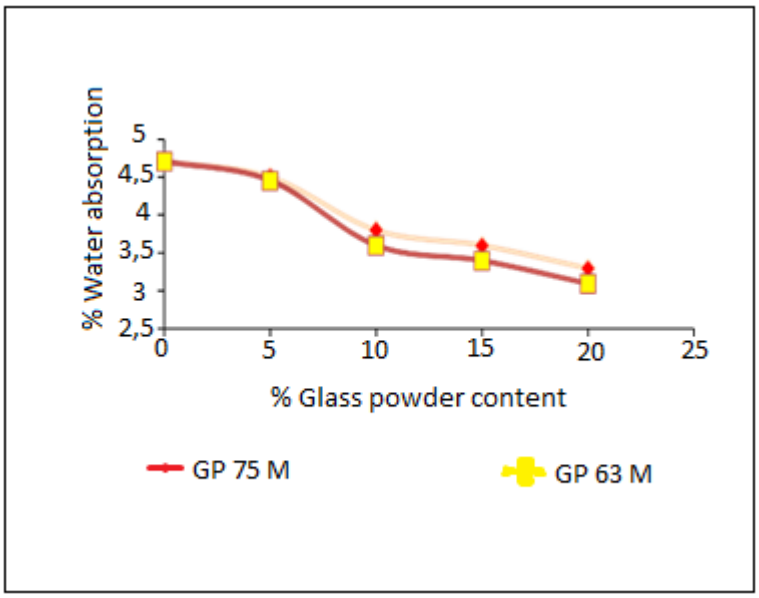


Figure I.30: Effet de la poudre de verre sur l'absorption de l'eau [80].

Nwaubani et al. [81] dans leurs recherches sur l'influence de la finesse des déchets de verre en poudre sur les propriétés des mortiers ont montré que l'absorption d'eau augmentait avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre. Les niveaux de substitution modérés tels que Mix 2 avec 5% de poudre de verre et Mix 3 avec 20% de teneur en poudre de verre atteint des valeurs similaires à celles du mélange témoin.

I.3.6.2. Retrait de séchage

Pour ce qui est du retrait de séchage, l'étude de Shayan et al. [38] montre que le retrait de séchage diminue avec la teneur en poudre de verre. Tous les mélanges avaient une valeur de retrait inférieure à la limite fixée par la norme australienne de 0,075%.

Les résultats obtenus par Chekireb [56] sur le retrait de séchage montrent qu'au bout de 140 jours tous les BAP contenant la poudre de verre ont un retrait de 0,055% et de 0,044%. Ces valeurs sont inférieurs à celle du témoin qui affiche 0,07%.

En conséquence, on peut noter que l'introduction de la PV dans les mortiers et les bétons réduit le retrait de séchage , ceci est confirmé par plusieurs recherches. La réduction du retrait de séchage en présence du PV peut être liée à la faible absorption d'eau de verre, ce qui entraine un exès d'eau dans le béton.

D'autre part Zidol [54] a trouvé que l'introduction de la poudre de verre dans les bétons ordinaires et les bétons à haute performance donne des valeurs de retrait similaires à ceux du témoin. Alors que l'introduction de 20% de PV dans les BAP présent des valeurs plus importantes d'environ 1,12 fois celui du temoin.

I.3.6.3. Réaction alcali-silice

Vers 1940, STANON a découvert une pathologie, la réaction alcali-granulats (ou alcali-silice) qui affecte les bétons et que les chercheurs ont surnommée «Le cancer des bétons» [82].

La réaction alcalis-silice est la plus courante des réactions alcalis-granulats. Elle est causée dans le béton par la présence de certains granulats silicieux qui entrent en réaction avec les alcalins (NaOH et KOH). Un gel expansif se produit et augmente de volume avec l'absorption de l'eau. Ce qui génère des désordres dans les bétons: fissuration, expansion et baisse des performances mécaniques.

La réaction alcali-silice (RAS) est une réaction chimique entre la silice de verre et les ions hydroxyles du béton [83].

La réaction alcali-silice peut être contrôlée par certains ajouts cimentaires tels que les fumées de silice, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, l'argile, le schiste calciné et d'autres pouzzolanes.

Plusieurs études ont confirmé que l'utilisation de la poudre de verre comme matériau cimentaire n'entraine pas de réaction alcali-silice (RAS) en présence d'alcalins et peuvent même atténuer la (RAS) [84].

Les résultats des travaux de Shi et al. [85] illustrés par la figure I.31 montrent que le remplacement du ciment par 20% de la poudre de verre ou de cendre volante réduit l'expansion de RAS.

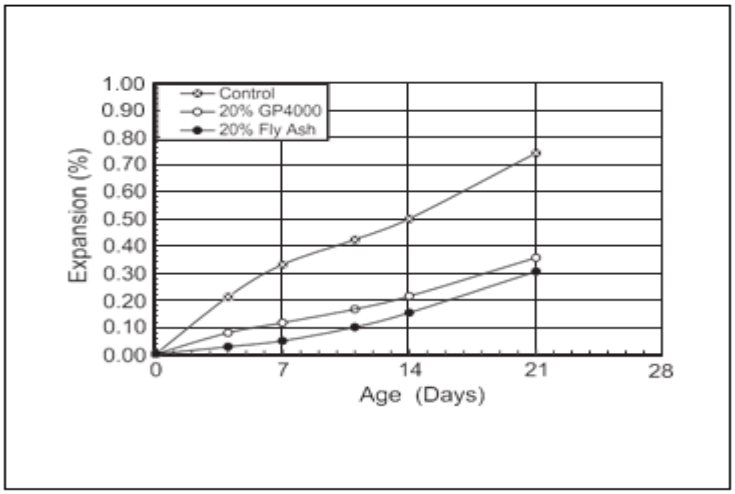


Figure I.31: Expansion RAS des barres de mortier [85] .

Shayan et al.[57] ont montré que l'utilisation des granulats de verre peut provoquer la réaction alcali-silice, alors que l'utilisation du verre sous forme de poudre contribue à contrer l'expansion des granulats (figure I.32).

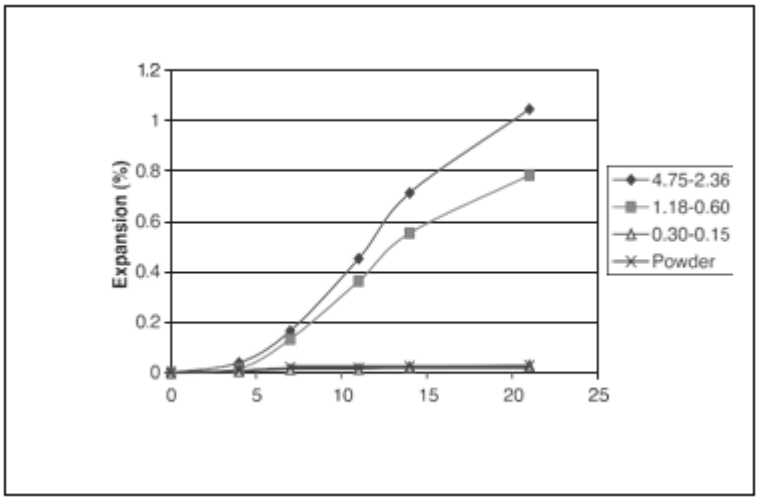


Figure I.32: Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [57].

Liu [86] Avaient observé que les bétons autoplaçants incorporant la poudre de verre développent une bonne résistance à la réaction alcali-silice, similaire à celle des bétons sans verre.

La figure I.33 illustre que l'expansion de chaque spécimen était inférieure à 0,10%, ce qui montre qu'il n'y a pas eu d'expansion dans les échantillons de mortier avec la poudre de verre.

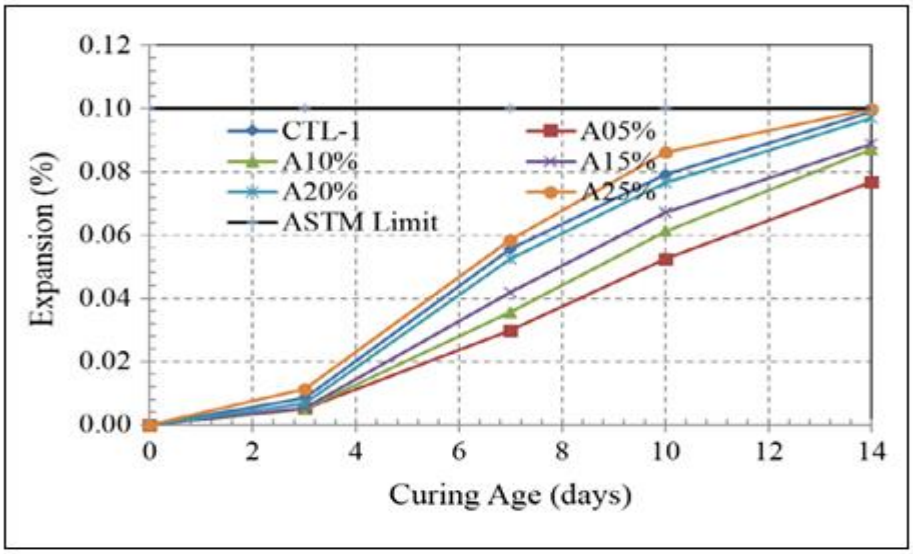


Figure I.33: Réaction alcali-silice des mortiers avec de la poudre de verre [77].

Guojun et al. [87] ont signalé que la poudre de verre avec une granulométrie allant de 28 à 53 µm présente l'expansion RAS la plus faible aux différents âges de durcissement .Comme montre la figure I.34, l'expansion de WG 20 et de WG 30 est largement inférieur au mélange de contrôle, la réduction est de 80,39 et 89,54% respectivement.Karemberi et al. [88] ont aussi déterminé que le verre finiment broyé à 90µm a l'effet de réduire l'expansion de RAS.

Aussi de nombreux autres chercheurs [54,59] affirment que l'utilisation de verre en poudre et très efficace pour réduire et éliminer le risque de la réaction alcali-silice RAS.

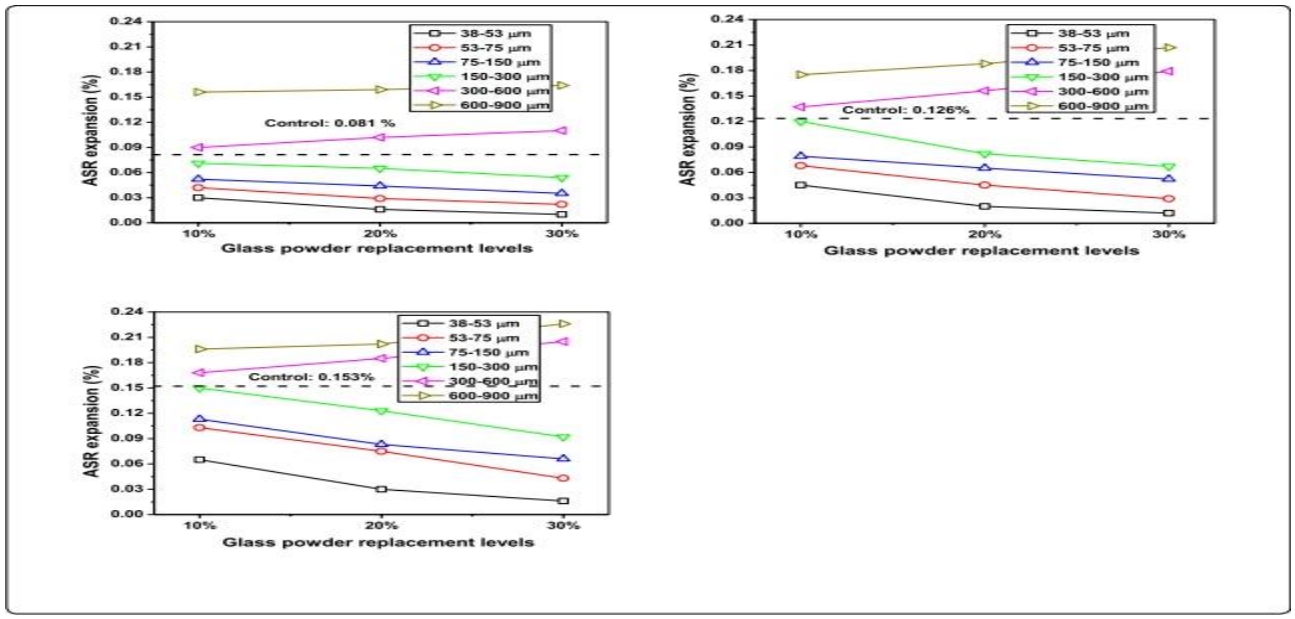


Figure I.34: Effet de la teneur en poudre de verre sur l'expansion RAS des barres de mortier de ciment à différents âges de durcissement. a- âge de cure de 14 jours, b- âge de cure de 28 jours, c -âge de cure de 35 jours [87].

I.3.6.4.Résistance à la pénétration des ions chlorure

Jihwan et al. [89] ont montré que l'incorporation de verre recyclé donne une meilleure résistance à la pénétration du chlorure, mieux que celle des cendres volantes. La figure 1.35 montre une amélioration de la perméabilité aux ions chlorure avec l'introduction de 30% de PV quelque soit le rapport E/C utilisé [90].

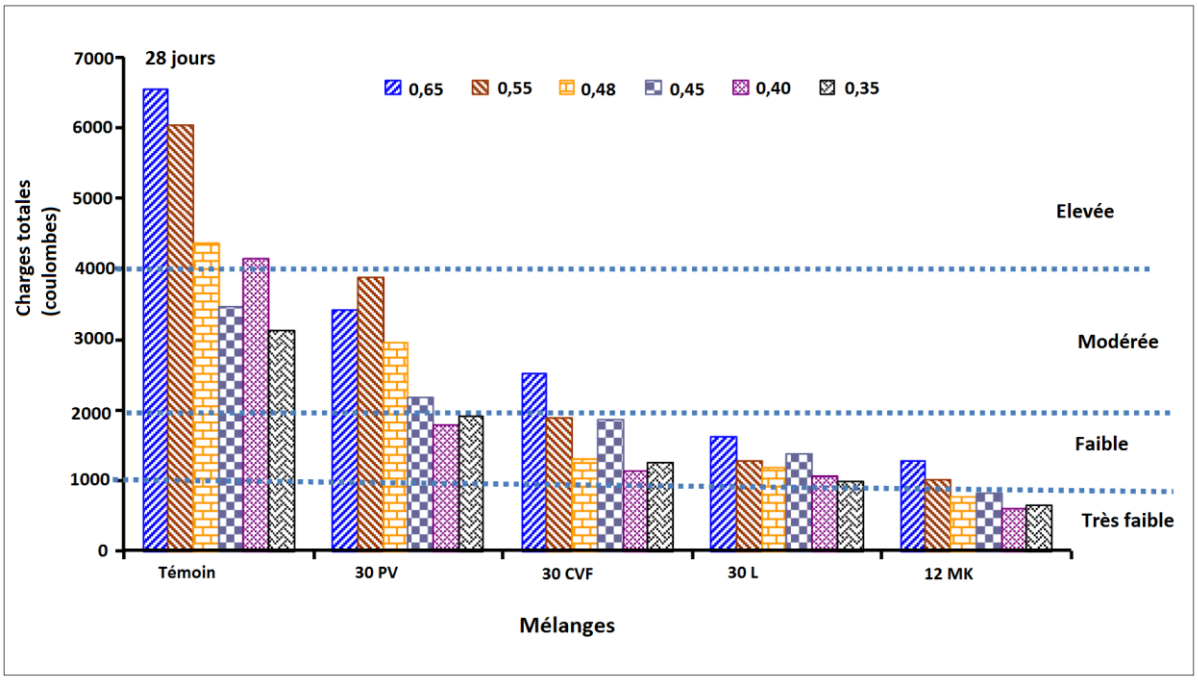


Figure I.35 : Pénétrabilité des ions chlorures à 28 jours des bétons incorporant 30 % d'ajouts cimentaires [90].

Kamali et al. [91] ont montré que l'ajout de la poudre de verre à des niveaux de remplacement de 5%, 10%, 15% et 20% réduit la perméabilité aux chlorures par rapport au béton témoin à tous les âges et la réduction des valeurs de perméabilité aux chlorures à augmenter avec l'augmentation des niveaux de remplacement du ciment par des poudres de verre. La réduction dans les valeurs de la perméabilité au chlorure peut être expliquée par l'amélioration microstructurale du béton provoquée par la réaction pouzzolanique et l'augmentation de l'hydratation résultant de l'addition de poudre de verre dans le béton.

I.3.6.5. Attaque des sulfates

La durabilité du béton suite à l'attaque des sulfates est important à savoir en presence de tel milieu vus les problèmes que peut entrainer comme une expansion, une fissuration, un effritement et une perte de résistance [92].

L'attaque au sulfate est généralement catégorisée comme attaque au sulfate interne ou externe par rapport à la source de sulfate. L'attaque interne au sulfate fait référence au cas dans lequel les constituants requis pour l'expansion et la fissuration, comme ceux provenant d'agrégats riches en sulfates ou de gypse en enexcès dans le ciment qui sont incorporés dans le béton au moment du malaxage.

Une attaque externe de sulfate se produit lorsqu'une ou plusieurs des espèces participent à l'attaque et pénètrent dans le béton par une source extérieure, comme le sol, les eaux naturelles ou les effluents industriels en contact avec une structure en béton [94,95].

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment permet d'augmenter la résistance aux sulfates du béton.

Bajad et al. [95] ont examiné l'effet de l'attaque du sulfate sur les propriétés du béton produit en remplaçant le ciment par les déchets de poudre de verre en divers pourcentages allant de 5% à 40% par incrément de 5%. Les résultats montrent qu'une meilleure résistance à l'attaque du sulfate pour le béton est à 20% de remplacement du ciment par la PV.

Tayeh et al. [96] ont constaté que le remplacement de 10% par la poudre de verre améliore la résistance au sulfate par rapport au mortier témoin.

I.3.6.6. Résistance aux gels-dégels

Kim et al.[89] ont constaté que l'incorporation de la poudre de verre dans le béton améliore leur résistance aux cycles gel-dégel. Lee et al. [97] ont également constaté que le béton avec 20% PV présentait une excellente résistance après 50 cycles de gel-dégel.

D'après Sihem [56] l'aspect visuel des échantillons de gel-dégel a montré que les échantillons des mélanges avec poudre de verre présentent moins de fissures par rapport à ceux du témoin.Ceci confirme que l'introduction de la poudre du verre offre au béton un excellent facteur de durabilité.

I.4. Intérêt de l'utilisation des déchets de brique comme ajout cimentaire dans le béton

Le ciment, clé de la construction du béton, est un élément essentiel de matériau de construction. Avec la technologie actuelle produisant 1 tonne de ciment, consomme 1,7 tonne de matières premières et environ 7 000 MJ d'énergie électrique et combustible [98] et émet 0,75 à 1 tonne de dioxyde de carbone, 1 à 2 kg de dioxyde de soufre et poussière [96,97]**.**

Une façon de réduire les impacts négatifs de l'industrie du ciment est le remplacement partiel de clinker par d'autres matériaux. Les déchets d'argile-brique constituent une source potentielle de matériau de remplacement. Cette stratégie présente l'avantage de réduire l'émission de CO_2 et la consommation d'énergie pour un environnement propre.

La brique d'argile est classée comme le deuxième matériau de construction le plus utilisé après le béton et elle est traitée comme un déchet de construction et de démolition C & D s'il y a des dommages pendant les activités de fabrication, de construction et de démolition [98,99].

Pendant les travaux de démolition, une grande quantité de briques d'argile est produite, il est estimé qu'il y aura au moins 5 milliards de tonnes de déchets de construction dans les 5 à 10 prochaines années, alors que les déchets de briques représentent 30 à 50 % [102].

Ces déchets doivent être transportés vers les décharges. Par conséquent, la réutilisation de la brique d'argile devient un besoin urgent. Dans cette partie on explore l'effet de la poudre de brique PB sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité des bétons et mortiers.

I.4.1. Fabrication des briques

Les briques sont fabriquées à partir d'argile et d'autres matières minérales similaires dans leur composition telle que le limon et le schiste. Le choix des terres argileuses est essentiel en raison de la spécificité de la granulométrie de chaque sol.

La préparation de l'argile se réalise en 3 étapes. La première étape consiste à fabriquer une pâte d'argile élastique. Pour ce faire, les matières extraites telles que l'argile, le limon ou le schiste sont concassées puis broyées au moyen de cylindres verticaux ou de broyeurs mécaniques. La poudre obtenue est mélangée à l'eau pour obtenir une pâte plus ou moins élastique afin de faciliter les opérations de moulage à venir et d'augmenter sa plasticité.

Le façonnage (moulage) est réalisé par deux procédures l'étirage et pressage. Les produits sont façonnés avec une teneur en eau de 15 à 30% (les chiffres exprimés en pourcentage par rapport au poids sec). Il est nécessaire avant la cuisson d'éliminer la plus grande partie de cette eau, par des séchoirs bien réglés [103].

La cuisson est la dernière étape que doit subir le bloc d'argile façonné et séché pour devenir ensuite une brique de terre cuite. La cuisson est réalisée dans des fours continus ou discontinus à une température comprise entre 850 °C et 1 200 °C. La température de cuisson est progressive et dépend du type d'argile [104].

L'humidité ainsi que l'eau absorbée sont évaporées à des températures allant jusqu'à 100°C. Les briques fabriquées à partir d'argile Illite libèrent l'eau adsorbée à partir de 300°C. Entre 400-450°C, l'eau liée chimiquement est libérée et la déshydroxylation de minéraux argileux se produit entre les températures de 450-700°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°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°C. La nucléation et la cristallisation de nouvelles phases se produit à des températures supérieures 1000°C.

Le frittage et la dissolution de certaines phases dans la masse fondue se produisent à des températures supérieures à 1100°C, les impuretés organiques et carbone dans la plage de températures de 300 à 1040 °C [105].

I.4.2. Recyclage des déchets de briques dans le monde

Un rapport des Nations Unies (2017) indique que la population mondiale devrait dépasser 9772 millions en 2050, soit une augmentation d'environ 30% par rapport à la population en 2017.

L'augmentation de la population est également un facteur qui contribue à l'augmentation soudaine des activités de construction. Cela accélère considérablement la production de déchets de construction et de démolition (C & D), qui se produit à la suite de l'excavation, l'entretien des routes, la construction, la réparation, la rénovation et activités de démolition.

Selon Yahya et al.[106], Jusqu'à 145 millions de tonnes de déchets C&D sont générés aux États-Unis chaque année, cette quantité représente un tiers du matériau total de la décharge.

De même, selon le département de la protection de l'environnement à Hong Kong (2017), les déchets C & D constituent à peu près 28% des déchets solides dans les décharges. Le rapport a également indiqué à Hong Kong, qu'il y avait environ 1,53 million de tonnes de déchets C & D en 2015, avec une augmentation de 6,6% par rapport à l'année précédente.

En Chine, Plus de 1 milliard de tonnes de déchets C & D ont été générées en 2013 [107], tandis que les déchets C & D s'élevaient à 55 millions de tonnes et à 49,1 millions de tonnes aux États-Unis Royaume-Uni et Angleterre, respectivement (Département de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales, 2016).

En Inde, environ 14,5 millions de tonnes de déchets C & D sont générées chaque année, qui comprennent le sable, le gravier, les briques, la maçonnerie et le béton [108].

Alors qu'en Malaisie, environ 26 000 tonnes de déchets de construction seraient générées quotidiennement [109] . Toutes les statistiques indiquent la génération énorme de ces déchets C & D, l'élimination accrue des déchets C & D, le déversement illégal et l'absence de lois peuvent tous deux entraîner une rareté de l'espace de décharge.

La brique est considérée comme le deuxième matériau de construction le plus utilisé après béton et il est traité comme des déchets C & D s'il y a des dommages pendant la fabrication, activités de construction et de démolition. Environ 80 % des déchets de C&D sont des déchets de béton et de briques d'argile [110,111].

En Chine, de nombreux bâtiments anciens ont été démoli ces dernières années en raison des activités de reconstruction et des activités de démolition une quantité considérable de déchets de briques, représentant environ 0,4 milliard de tonnes par an [112].

Pour une superficie d'environ 50 000 m^2, 315 tonnes de déchets de briques et de blocs pourrait être généré [113] et cette quantité est similaire à la quantité de déchets de briques générés par les activités de construction et de démolition de 16 sites du projet dans l'état Penang en Malaisie [114].

L'Inde est le deuxième plus grand producteur de briques dans le monde, et les déchets de briques représentent 31% du total des déchets de C & D produits chaque année, ce qui est supérieur aux déchets de béton [115], alors qu'à Taiwan, 0,24 million de tonnes de déchets de briques auraient été générés chaque année [116]. Les Statistiques fournies par l'Agence des Nations Unies pour la protection de l'environnement des États-Unis (2016) a montré qu'environ 44 millions de tonnes de déchets de briques ont été obtenus par des activités de construction et de démolition entre 2012 et 2014.

Une énorme zone d'enfouissement est généralement requise pour permettre l'élimination des déchets de briques. Ces volumes importants de C& D ont motivé la recherche pour des alternatives permettant une meilleure utilisation des différents composants (brique, verre, céramique et béton). Comme pour les déchets de verre, il n'y a pas d'informations claires sur la quantité de déchets de brique dans le monde, ni pour la quantité recyclée.

I.4.3. Effet de la poudre de brique sur l'ouvrabilité et le temps de prise

Il est bien connu que la brique est un matériau d'origine argileux, se caractérise par une grande capacité d'absorption en eau, ce qui conduit à une diminution significative de la fluidité des mortiers et bétons

La figure I.36 montre la tendance générale observée pour la perte de fluidité dans les trois types de briques utilisés pour remplacer le ciment [117].

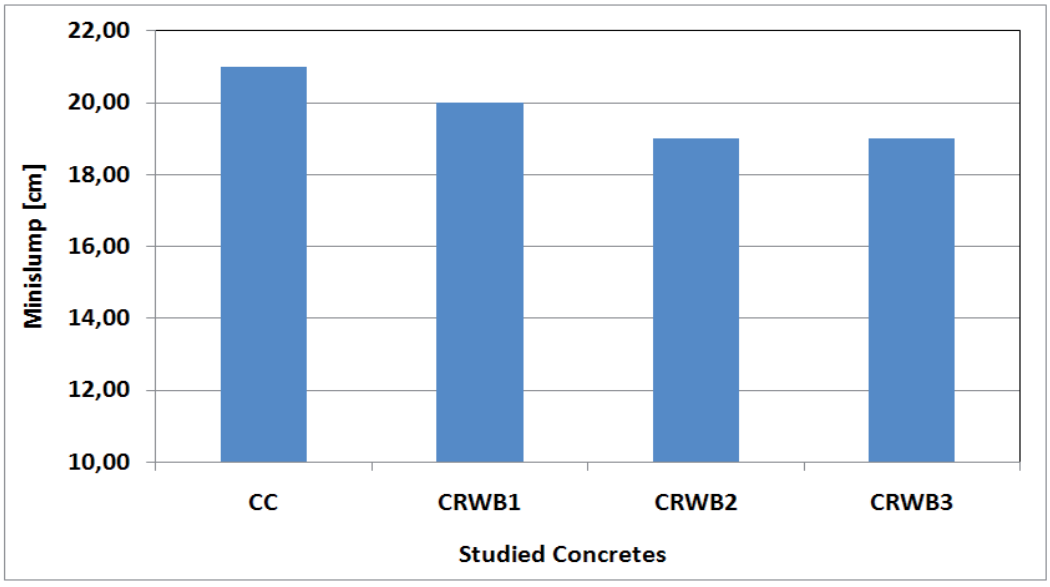


Figure I.36: Affaissement du béton [117].

Ge et al. [1] ont visé d'étudier l'influence des niveaux de substitution et granulométrie du CBP (clay-brick-powder) sur les propriétés du béton frais et durci. Trois types de CBP de granulométrie différentes (type A=0,09 µm, type B=0,06 µm, type C=[0,10-0,01]µm) et trois niveaux de remplacement (10, 20 et 30%) ont été employés. Le rapport E/C est 0,28. La figure I.37 présente les résultats d'affaissement de différents types de brique utilisés. Pour le béton à 10% de CBP, l'affaissement était similaire au béton de référence avec une moyenne de 27 mm. Cependant, comme le niveau de remplacement augmente à 20% ou 30%, il y a une forte réduction d'affaissement. L'affaissement a varié de 23 mm à 50 mm seulement pour le béton avec CBP du type A et B. Pour le type C de CBP, la perte rapide d'affaissement s'est produite comme le contenu est passé de 20% à 30%. La réduction d'affaissement est principalement causée par une absorption d'eau élevée, une angularité et une surface rugueuse du CBP. Le niveau de remplacement optimal est 10%, sauf pour le CBP du type C qui pourrait être utilisé jusqu'à 20% sans perte d'affaissement importante.

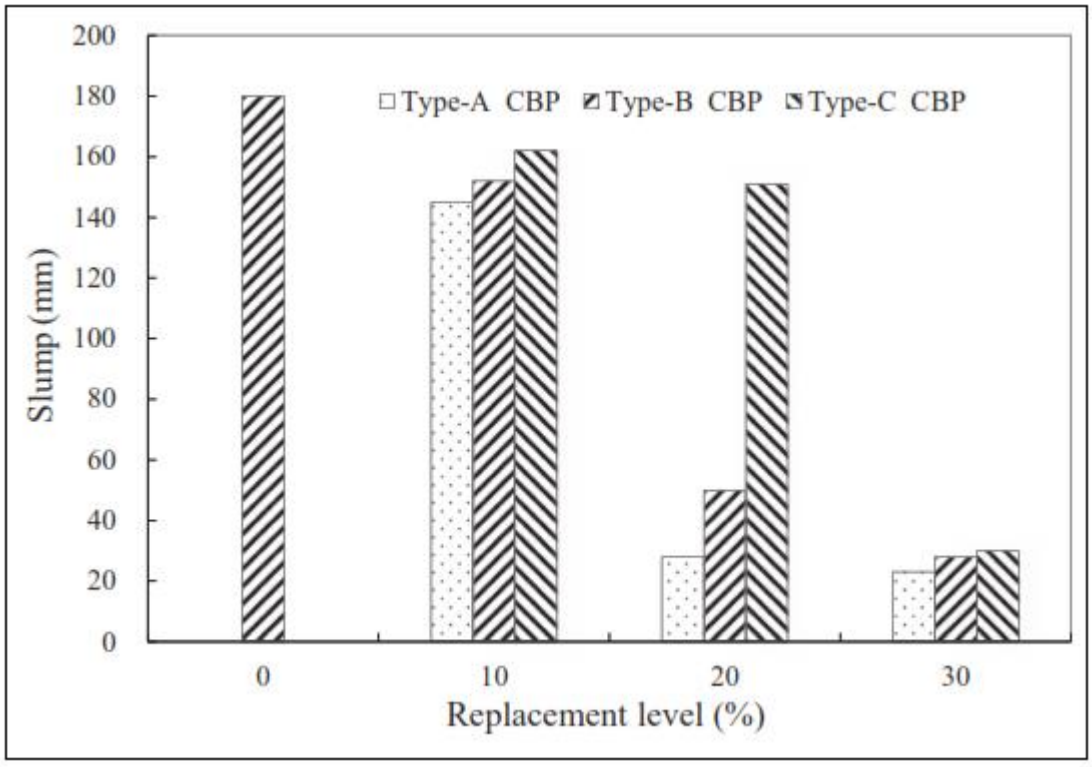


Figure I.37 : Effet de la poudre de brique (CBP) sur l'affaissement des bétons [1].

Schackow et al. [118] ont rapporté le remplacement partiel du ciment dans des mortiers avec des déchets de brique d'argiles broyées et tamisées à 45 µm pour obtenir une poudre fine utilisée dans des proportions de 10, 25 et 40% . Les résultats montrent une réduction d'affaissement, en raison d'une consommation accrue d'eau par la PB. Le mortier sans PB est l'échantillon le plus fluide, tandis que le 10% de PB a montré une réduction de 8,5% de l'étalement.

Olofinnade et al. [119] ont incorporé 0, 10, 20, 30, 40% de briques en terre cuite tamisées à 75 µm, comme remplacement partiel de ciment avec un rapport E/C=0,5. Les résultats à l'état frais ont montré une diminution de l'affaissement du béton avec l'augmentation de pourcentage de remplacement de PB, la maniabilité du béton reste à peu près constante entre 10 et 20% de remplacement comparé au béton témoin. Cependant, une diminution de la maniabilité avec 30 et 40% de PB a été constatée.

Irki et al. [120] ont étudié l'utilisation des déchets de brique comme poudre fine dans le béton autoplaçant. Le ciment a été remplacé par la poudre de brique recyclée a des niveaux de 0, 5, 10, 15 et 20%, avec trois finesses différentes (3900, 4300 et 5200 cm² / g) et un rapport E/C fixe de 0,4. Les résultats montrent que la substitution du ciment par la poudre de brique avec une teneur plus élevée (20%) diminue l'ouvrabilité du mortier autoplaçant (d'environ 3%) et réduit son aptitude au passage (d'environ 30%), les mélanges contenant plus de 20% de poudre de brique recyclée avaient une faible capacité d'écoulement (figure I.38).

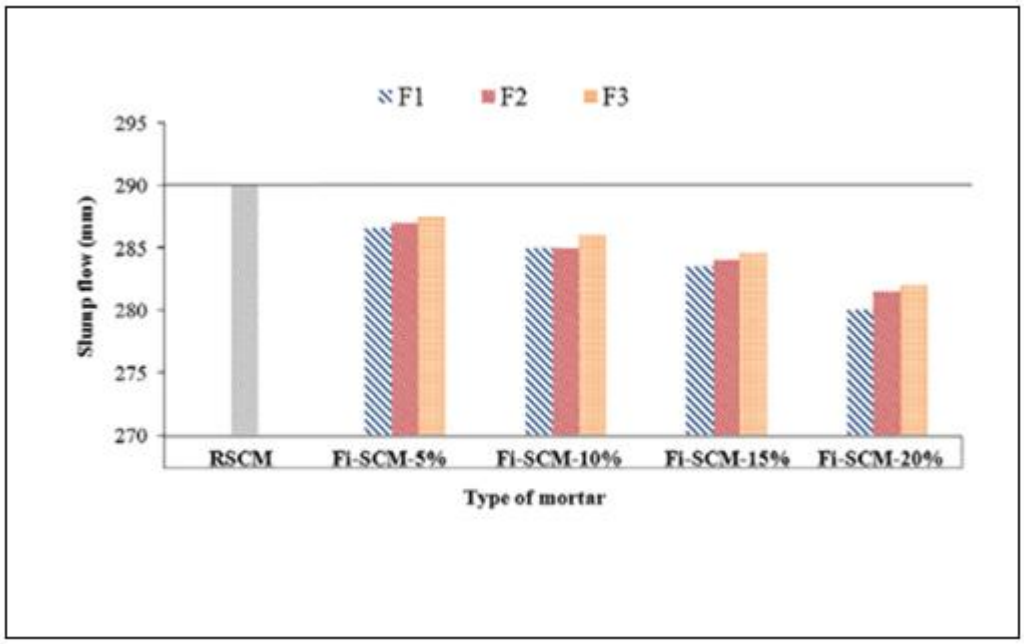


Figure I.38 : Effet de la finesse de Blaine de la brique recyclé sur l'écoulement des mortiers autoplaçant [120].

En revanche, l'augmentation de la finesse de Blaine a permis d'améliorer le comportement frais des mortiers lorsque le contenu de la poudre de brique recyclée est resté constant, et lorsque la finesse de la poudre de brique recyclée est maintenue constante, la fluidité diminuee à mesure que le taux de remplacement du PB augmente.

Heikal et al. [121] ont étudié l'influence de la brique d'argile broyée (PB) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP. Le ciment a été remplacé par des briques d'argile broyées à des niveaux de 0%, 12,5%, 25% et 37,5% en masse (c'est-à-dire 0, 50, 100 et 150 kg / m3), avec un rapport E/L fixe de 0,5. Ils ont trouvé une diminution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du dosage de mélange BAP, à mesure que le dosage du mélange BAP augmente, la surface augmente et plus de dispersion se produit conduisant à augmenter l'ouvrabilité de la pâte.

La prise est une étape primordiale pour la résistance et la durabilité de béton. Une mauvaise prise de béton peut donc faire perdre de la résistance à ce dernier et même, malheureusement, laisser apparaître des fissures dans le futur.

Naceri et al. et Cheng et al. [124,111] ont trouvé que l'incorporation de la poudre de brique d'argile peut conduire à une augmentation de temps de prise initial et final.

Lin et al. [124] ont effectué des essais sur le temps de prise initial et final pour des bétons contenant la brique broyée. Les pourcentages de substitution par rapport poids de ciment étaient 0, 10, 20, 30, 40 et 50%, avec un rapport E/L =0, 38 et une surface spécifique de Blaine de 5000 cm^2/g. Les résultats montrent que le temps de prise initial et final augmente avec l'augmentation de la teneur en poudre de brique.

Demir et al. [125] ont aussi étudié le temps de prise initiale et finale des mortiers avec la brique de terre broyée à des niveaux de 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% et 15%, avec un rapport E/C=0,5 et une finesse de Blaine de 5200 cm^2/g. Les résultats ont indiqué que le temps de prise initiale et finale augmente avec l'augmentation de la poudre de terre broyée.

I.4.4. Effet de la Brique cuite sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers

I.4.4.1. Résistance à la compression

Gonçalves et al. [126] ont remplacé le ciment dans les mortiers avec de la brique d'argile calcinée broyée (PB) à des niveaux de 0%, 10%, 20%, 30% et 40% en poids. Avec un rapport E/C fixe de 0,5 et un SP à base de naphtaléne sulfonât pour avoir la maniabilité souhaitée. Les résultats montrent que 10% de PB présente la résistance à la compression la plus élevée.

O'Farrell et al. [127] ont partiellement remplacé le ciment par la brique en terre cuite broyée (PB) à des niveaux de 0%, 10%, 20% et 30% , avec un rapport E/C=0,5. Les résultats montrent que le remplacement du ciment par la poudre de brique réduit la résistance à la compression à un âge précoce (jusqu'à 28 jours). Cependant à 90 jours la résistance à la compression augmente d'environ 10% pour la composition à 10% de remplacement. Au-delà de 20%, la PB réduit la résistance à la compression d'environ 25%.

Kirgiz et al. [128] ont formulé des mortiers avec différents pourcentages de la poudre de brique (PB) 6%, 20%, 21% et 35% avec un rapport E/C=0,5 et une surface spécifique de Blaine de 5978.7 cm^2 /g. Les résultats ont montré une augmentation de la résistance à la compression jusqu'à 7% pour un niveau de remplacement de 20% à 28 jours. Aussi, la PB permettait de continuer à gagner de résistance jusqu'à 90 jours.

Ortega et al. [129] ont étudié l'influence à long terme (jusqu'à 400 jours) de la poudre de brique sur les propriétés microstructurales, mécaniques et durabilité des mortiers. Pour cela la poudre de brique remplaçait le ciment à des taux de substitution de 0%, 10% et 20% en poids. Avec un rapport E/L fixe de 0,5 et une surface spécifique de 6485 cm^2/g, les résultats montrent que 10% de la poudre de brique procure une résistance à la compression la plus élevée à 400 jours. La résistance à la compression augmente avec l'âge de durcissement pour tous les mortiers étudiés. D'après la figure I.39 il est à remarquer que l'ajout de 10% et 20% de poudre de brique n'a pas entraînée de perte de résistance à la compression des mortiers.

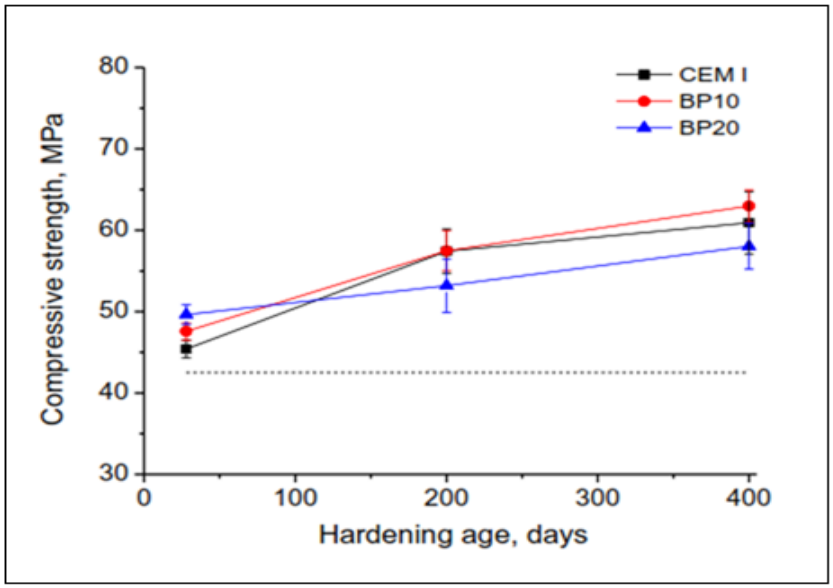


Figure I.39 : Résistance à la compression des mortiers [129].

Rakhimova et al. [130] ont examiné l'effet de l'addition de la brique d'argile broyée (PB) sur les propriétés des pâtes et mortiers frais et durcis. Pour cette étude le ciment a été remplacé par la (PB) de 0% jusqu'à 100% avec un pas de 20%. L'amélioration de la résistance à la compression à 28 jours était de 15% à 40% de remplacement de poudre de brique. Au-delà de 40% la résistance à la compression diminue.

O'Farrell et al. [131] ont réalisé une étude sur les propriétés des mortiers incorporant deux types de briques différents. Le premier type est de la brique d'argile traitée thermiquement (HTC) chauffé à 800 °C avec une rampe de chauffage de 100 °C par heure, sa surface spécifique varie entre 3200 et 3500 cm^2/g. Le deuxième type est de la brique d'argile broyée (PB). Ils ont remplacé le ciment dans les mortiers par la poudre de brique à des concentrations de 0%, 10%, 20% et 30% avec un rapport E/L=0,5.Les résultats montrent que le remplacement partiel de ciment avec PB où HTC entraîne une diminution de la résistance à la compression dès le plus jeune âge qui est considérablement en dessous de ceux du béton de contrôle, cependant, à 90 jours l'amélioration de la résistance à la compression est remarquable jusqu'à 20% de remplacement. L'augmentation du niveau de remplacement entraîne une diminution de la résistance.

Afshinnia et al. [132] ont évalué l'impact de la brique d'argile broyée en tant que ciment et agrégat dans des mélanges de mortiers. Les mortiers de ciment ont été remplacés (en poids) par 10%, 25%, et 50% de briques broyées. Les résultats indiquent que la résistance a été réduite avec l'augmentation de 10% à 50% de poudre de brique. L'indice d'activité de résistance à 28 jours était d'environ 92%, 86%, et 59% pour le remplacement 10%, 25% et 50% respectivement (figure I.40).



Figure I.40 : Indice d'activité de résistance des échantillons de mortier contenant de la brique concassée broyée [132].

Liu et al. [133] ont étudié l'effet de la poudre de brique d'argile (PB) sur les propriétés d'hydratation et leur mécanisme d'action dans les pâtes de ciment. Pour cela le ciment a été remplacé par la poudre de brique d'argile à des concentrations de 0%, 15%, 30%, et 45% en poids. Avec un rapport E/C =0,4 et deux finesses différentes A= 4600 cm^2/g et B=6320 cm^2/g, dont deux conditions de durcissements différentes, une condition standard avec une température de 20 °C et une température de 80 °C. Les résultats montrent que la résistance à la compression des pâtes diminue avec l'augmentation du contenue en PB, mais s'améliore avec l'augmentation de la finesse de PB (A vs. B) et température de durcissement (20 vs. 80 °C). Du point de vue âge d'hydratation, la résistance précoce de ces pâtes de ciment contenant du PB est faible tandis que leur résistance ultérieure se développe plus rapidement. Dans les mêmes conditions, la résistance à la compression du groupe B est supérieure à celle du groupe A, ce qui peut être dû à la surface spécifique élargie des particules de PB qui augmentent la réactivité et la probabilité de contact avec l'eau, favorisant la réaction d'hydratation. De plus, quand PB est plus fine, elle a un effet de remplissage plus élevé. Le traitement à la vapeur à haute température a un rôle important dans la promotion du taux d'hydratation et du degré l'hydratation de ciment. La résistance à la compression a été réduite (jusqu'à environ 31%) lors du remplacement jusqu'à 45%. Le durcissement thermique a augmenté la résistance à la compression d'environ 25% par rapport au durcissement standard à 20 °C (figures I.41-I.42).

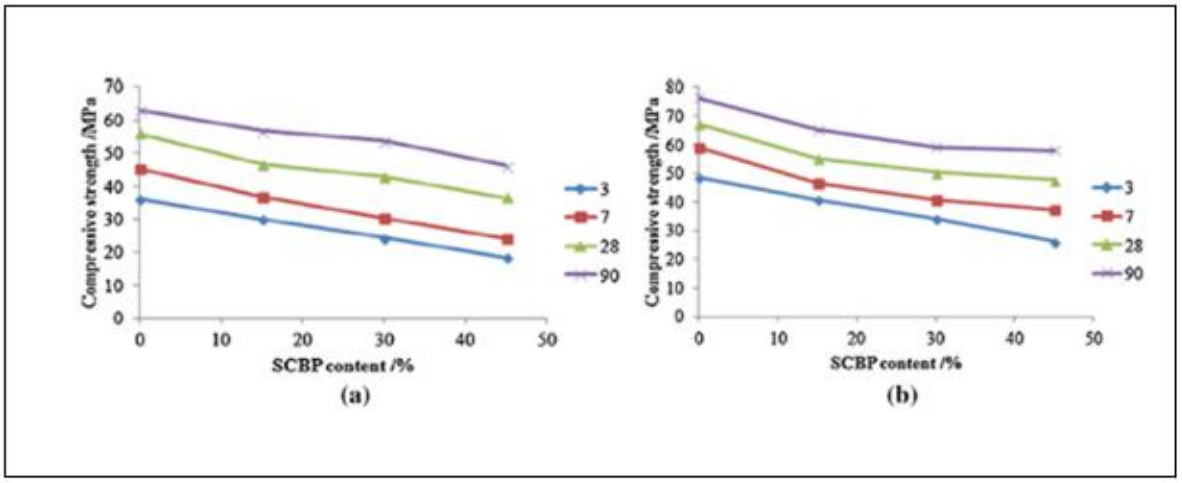


Figure I.41 : Résistance à la compression des pâtes contenant du SCBP (Sintered Clay Brick Powder) de groupe A (finesse de 4600 cm^2/g) dans différentes conditions de durcissement : (a) un durcissement standard (20 °C); (b) traitement à la vapeur (80 °C) [133].

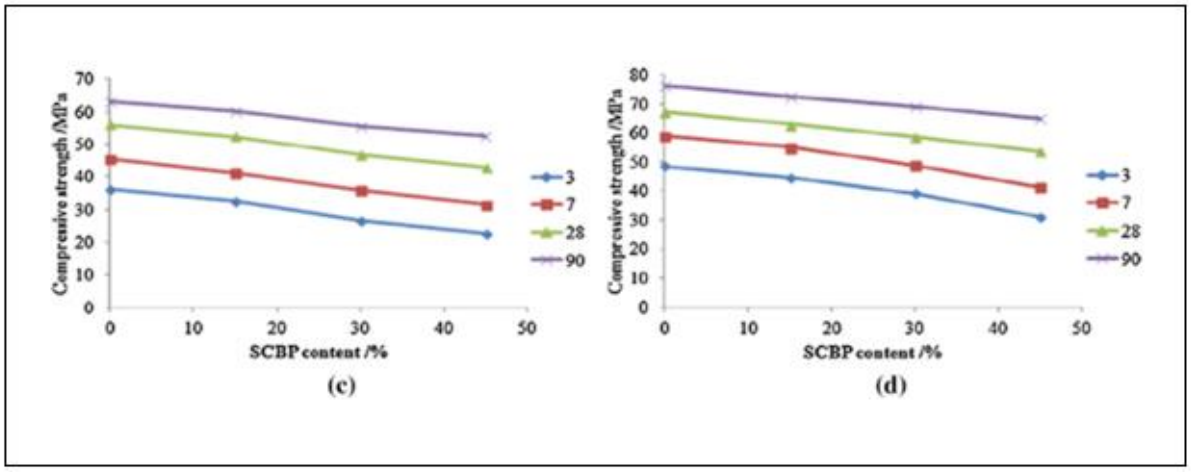


Figure I.42 : Résistance à la compression des pâtes contenant du SCBP de groupe B(finesse de 6320 cm2/g) dans différentes conditions de durcissement : (a) un durcissement standard (20 °C); (b) traitement à la vapeur (80 °C) [133].

Toledo et al. [134] ont examiné l'influence des déchets de brique recyclés comme agrégat et poudre sur les propriétés de béton. La poudre de brique est rajoutée dans le béton comme ajout cimentaire à des taux de 0%, 10%, 20%, 30% et 40%. Ils ont utilisé deux rapports différents de E/C : 0,4 et 0,5.

Pour les mortiers de la première série M1(E/C=0,4 contenant jusqu'à 20% de remplacement de ciment, presque aucune différence n'a été observée dans la résistance à la compression, par contre pour la deuxième série M2 (E/C=0,5) contenant jusqu'à 20% de remplacement du ciment, elle présente une légère diminution des valeurs de résistance. Les résultats ont indiqué que 20% présente la résistance à la compression la plus élevée avec le rapport E/C=0,4 (figures I.43-I.44).

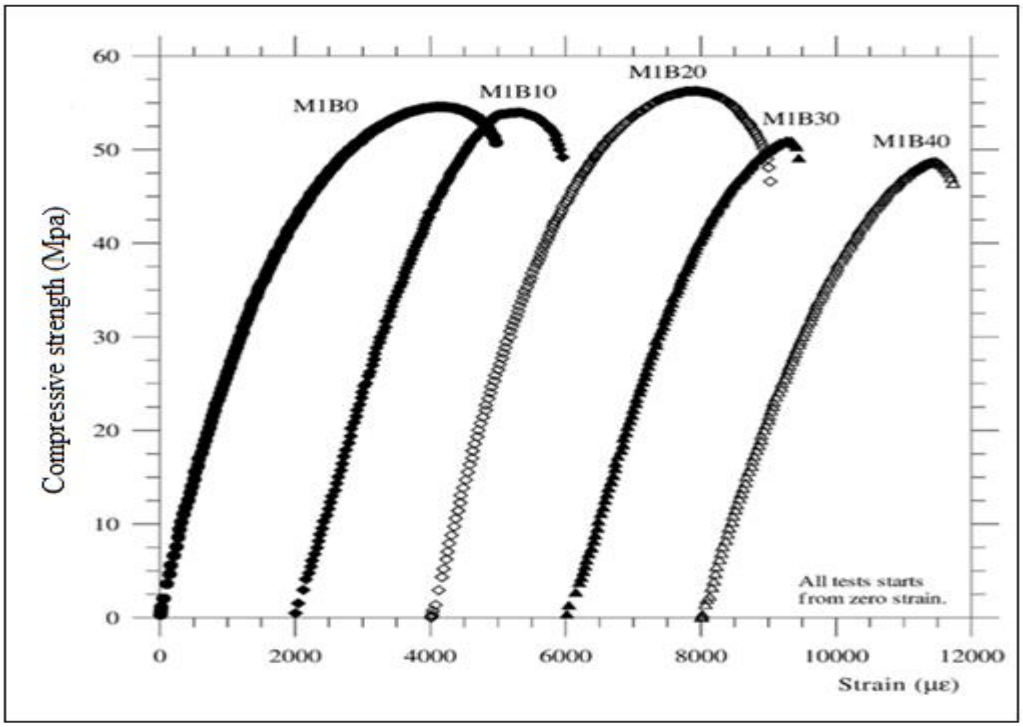


Figure I.43 : Résistance à la compression des mortiers avec un rapport E/C=0,4 [134].

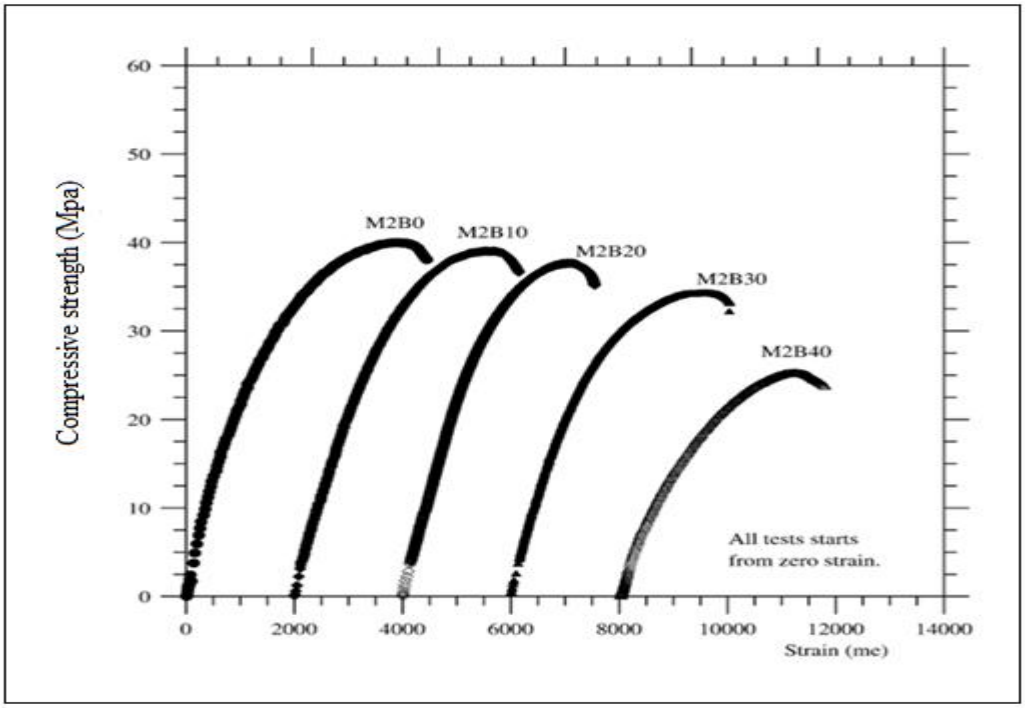


Figure I.44 : Résistance à la compression des mortiers avec un rapport E/C=0,5 [134].

Turanila et al. [135] ont travaillé sur deux types de briques comme matériau pouzzolanique : les briques pour dalles (SB) avec une finesse de Blaine 4260 cm^2/g , et les briques de la construction des murs (WB), Sa finesse de Blaine 5059 cm^2/g , dont les pourcentages 0%, 10%, 20% et 30%, la principale différence dans le processus de fabrication de SB et WB est la température de cuisson 800–900 °C pour la brique murale et 1000–1100 °C pour la brique de dalle, le rapport E/L=0,5 est commun pour les deux types. Les résultats ont indiqué que la résistance à 28 jours la plus élevée est pour le 20% de remplacement pour les deux types de PB.

Naceri et al. [122] ont examiné l'utilisation des déchets de briques broyée (PB) comme remplacement partiel de ciment sur les propriétés frais et durcis du mortier. La figure I.45 montre que les résistances à la compression des mortiers durcis à 7 et 28 jours diminuent avec l'augmentation de la teneur en poudre de brique. Par contre à 90 jours, les mortiers contenant jusqu'à 10% de la poudre de brique atteindront une résistance comparable à celle d'un témoin sans brique.

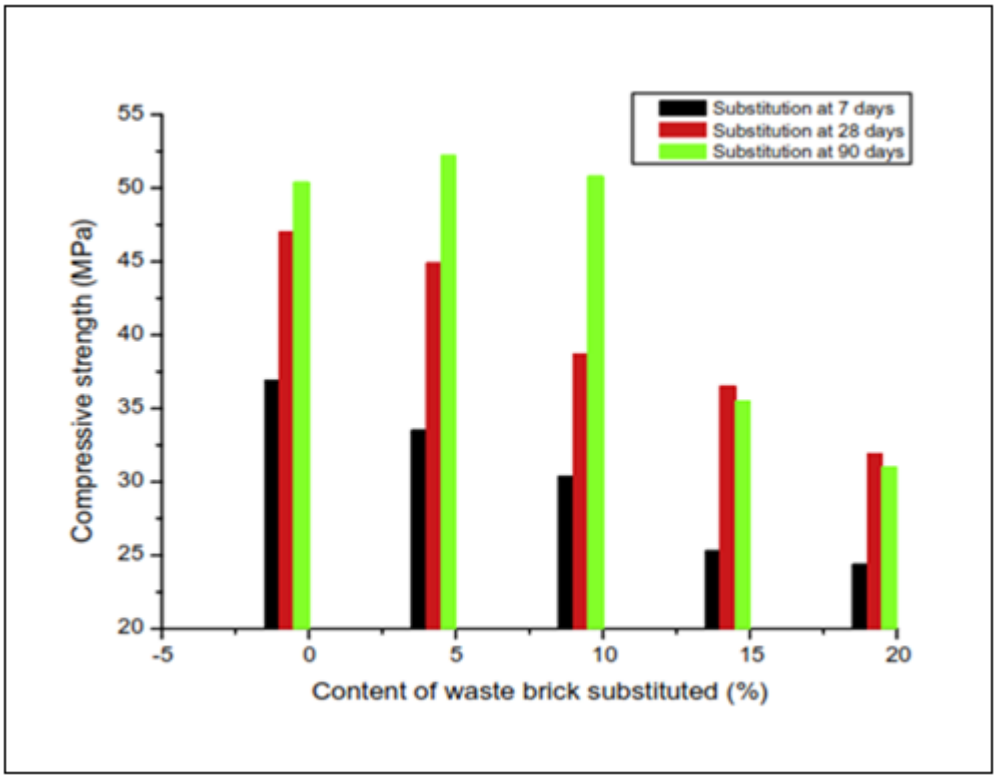


Figure I.45 : Résistance à la compression en fonction de % de remplacement par PB [122].

Aliabdo et al. [136] ont étudié la résistance à la compression des bétons contenant 0%, 5%, 10%, 15% et 25% de la poudre de brique d'argile (PB) avec des tailles <75µm et un rapport E/C de 0,4. Les résultats indiquent que le remplacement partiel de ciment par la PB réduit la résistance à la compression. La réduction de la résistance à la compression à 28 jours était d'environ 25,2% au niveau du remplacement de 25% (figure I.46).

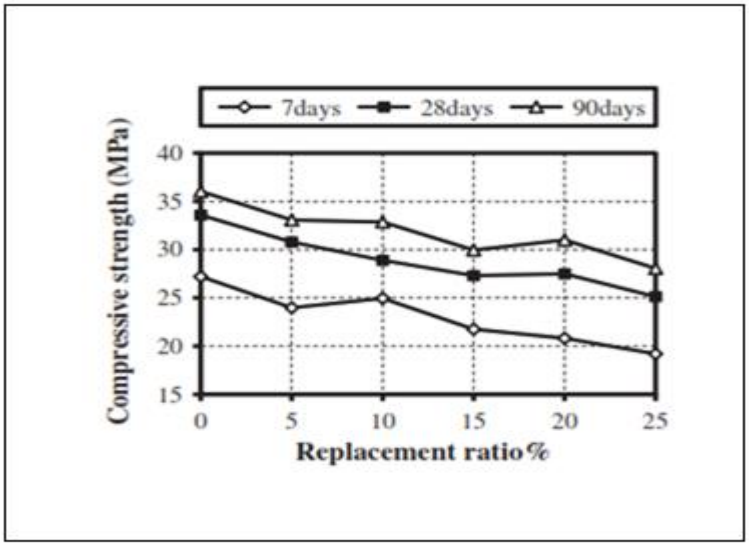


Figure I.46 : Effet du PB sur la résistance à la compression du mortier [136].

Oti et al. [137] ont étudié la résistance à la compression à 28 jours, pour des bétons contenant 0%, 10%, 20%, 30% et 40% de la poudre de brique et un rapport E/L fixe de 0,6 a été utilisé. Les résultats révèlent que 10% de la poudre de brique donne la résistance à la compression la plus élevée (figure I.47).

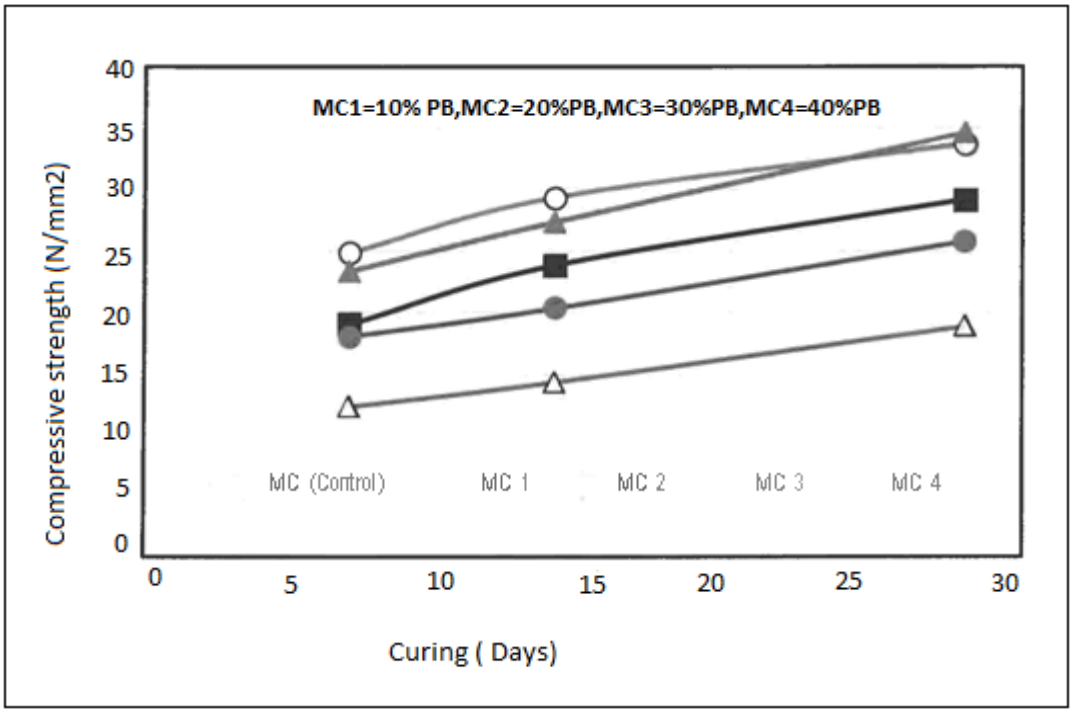


Figure I.47 : Résistance à la compression pour tous les mélanges [137].

Yasong et al. [138] ont évalué l'effet de la poudre de brique avec quatre tailles différentes (CBP1=10 min de broyage), (CBP2=30 min), (CBP3=60 min), (CBP4=120 min) avec une vitesse de 400 tours par minute. La poudre de brique est remplacée à 30% avec un rapport E/C=0,5. Les résultats montrent que la résistance à la compression à 7 jours de M4 (mélange avec CBP4) est de 66,9% de M0 (Mélange de référence), alors qu'à 90 jours la résistance est de 92,5% de M0.

Le M2 (mélange avec CBP2) a montré une résistance à la compression la plus élevée à 56 jours. Cependant le M4 à une meilleure résistance à la compression à 90 jours.

I.4.4.2. Résistance à la traction-flexion

Karatas et al. [139] ont examiné la résistance à la traction du mortier contenant 5% à 30% de PB en poids. La résistance à la traction a été mesurée à différents âges 3, 7, 28 et 91 jours. Les résultats ont montré que l'inclusion de 5% de PB a présenté la résistance à la traction la plus élevée. Alors que la résistance des mortiers contenant 10, 15 et 20% de PB a augmenté pendant les 7 premiers jours, puis a diminué.

Zeghad et al. [117] ont montré que la résistance à la traction augmente avec l'âge pour tous les bétons. Cependant, la résistance à la flexion diminue en fonction du type de la poudre de brique ajoutée.

I.4.4.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton est généralement considéré comme étant fonction du module d'élasticité de granulat, de la pâte de ciment durci et de sa fraction volumique.

Ge et al. [100] ont rapporté une diminution du module d'élasticité des bétons contenant de la poudre de brique (PB) en tant que remplacement du ciment à des niveaux de 10, 20, 25 et 30% (avec différentes tailles). Cette diminution est en raison du faible module d'élasticité de la brique.

La figure I.48 montre que l'augmentation du remplacement du ciment par la poudre de brique entraine une diminution continue du coefficient d'élasticité des mortiers, avec des réductions pouvant atteindre 10% en comparaison au mélange de contrôle [126].

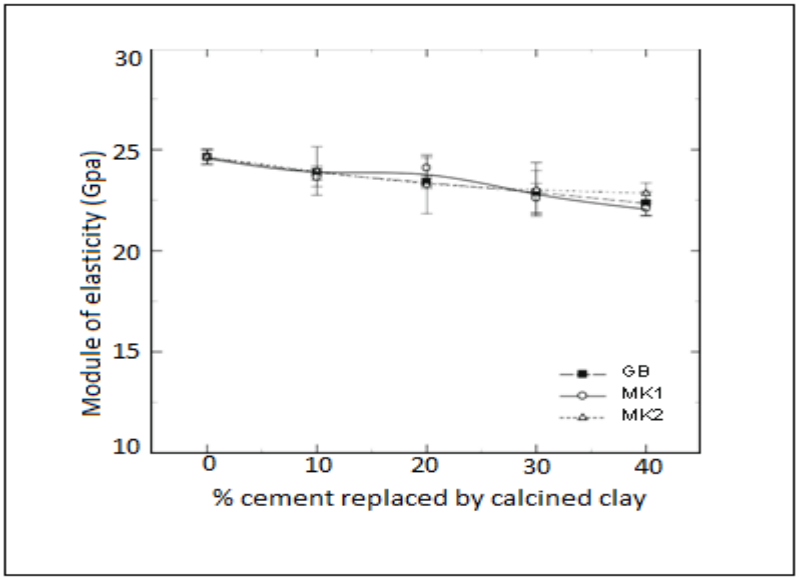


Figure I.48 : Module d'élasticité des mortiers [126].

I.4.5. Effet de la brique sur la durabilité des bétons/mortiers

I.4.5.1. Absorption d'eau

Ge et al. [1] ont formulé des bétons avec trois types de CBP (clay-brick-powder) de granulométrie différente et avec trois niveaux de remplacement 10, 20 et 30%. Les résultats ont enregistré une augmentation de l'eau absorbée à mesure que le niveau de remplacement et la taille des particules augmentent. Le béton avec 10% de CBP a montré moins d'absorption d'eau par rapport au mélange de référence en raison de la structure raffinée des pores.

I.4.5.2. Retrait

Li et al. [140] ont constaté qu'au début, le retrait augmente avec le temps assez rapidement avec l'introduction de la PB, mais a des âges plus avancés le retrait augmente à un rythme progressivement décroissant jusqu'après 90 jours. En général le retrait diminué avec l'augmentation de la quantité de PB.

Comme montre la figure I.49, les valeurs de retrait de séchage augmentent avec l'augmentation de la teneur en brique recyclée et aussi avec le temps de durcissement .Ils attribuent cet effet négatif à l'évaporation importante de la quantité d'eau [122].

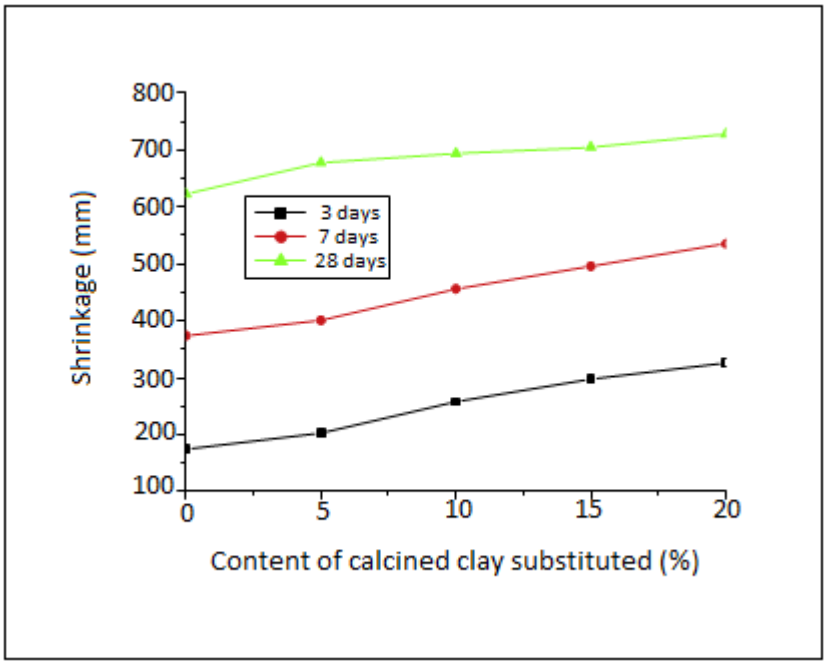


Figure I.49. Variation du retrait en fonction de la teneur en briques [122].

En revanche, Ge et al. [1] ont révélé que la forte absorption d'eau de la poudre de brique pourrait contribuer à l'effet du durcissement interne et donc réduire le retrait autogène précoce du béton.

I.4.5.3. Réaction alcali-silice RAS

Afshinnia et al. [132] ont rapporté que l'incorporation de la brique concassée broyée comme remplacement partiel du ciment entre 10 et 25% a montré une réduction de 22% et 47% comparé à celui de mortier de contrôle. La taille des particules de brique joue un rôle important pour atténuer l'expansion de RAS dans les mortiers. Des études ont montré que l'expansion du mortier pourrait être diminuée par la poudre de brique avec des taux de remplacement de 15% à 25% de ciment, l'expansion pourrait être efficacement contrôlée [141].

Turanli et al. [135] ont montré que l'ajout de 30% de SB (briques pour dalles avec une finesse de 4260 cm^2 /g) réduit l'expansion de 88% par rapport au contrôle à 14 jours. De même, une réduction de 75% de l'expansion a été trouvée à 30 jours.

Comme montre la figure I.50 pour les mélanges avec WB (briques pour la construction des murs avec une finesse de 5059 cm^2 /g) l'expansion diminue à mesure que la teneur en WB augmente. La plus grande réduction avec WB a été à 30% de remplacement, la diminution était de 82% et 69% à 14 et 30 jours respectivement.

Les performances des deux poudres de briques étaient presque identiques sauf au niveau du remplacement de 30% ou le SB était marginalement mieux que WB.

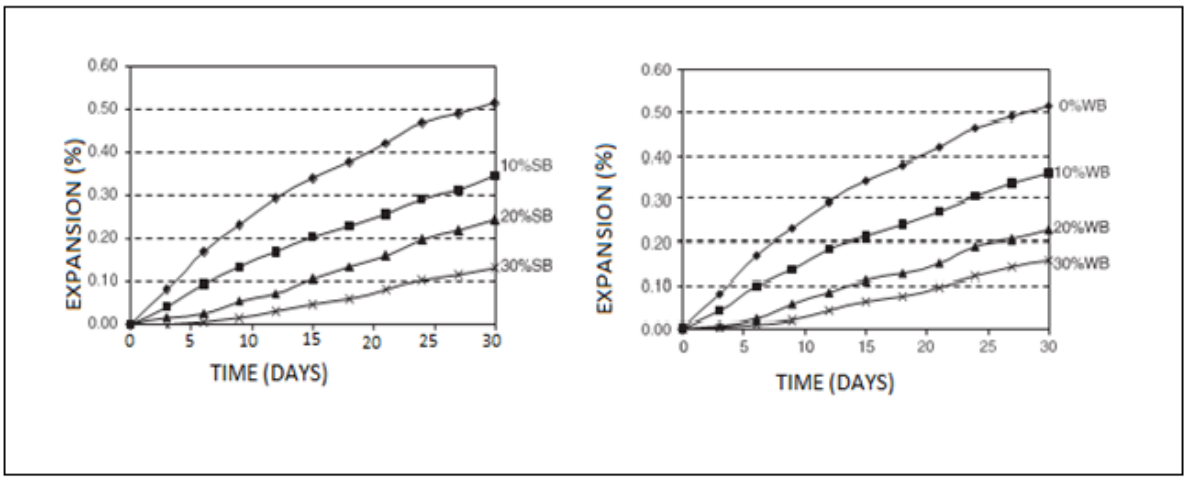


Figure I.50: Courbes d'expansion des échantillons contenant différentes quantités de SB et WB [135].

I.4.5.4. Résistance à la pénétration des ions chlorure

Gonçalves et al. [126] ont étudié la pénétration du chlorure dans des mortiers contenant 10, 20, 30 et 40% de la poudre de brique (PB) comme remplacement du ciment. Ils ont constaté que le remplacement du ciment par la PB a entrainé une réduction de 1,5 à 6 fois pour les mélanges contenant 10% et 20% de PB respectivement.

Il a été conclu que la résistance à la pénétration des ions chlorure est associée directement au raffinement de la structure poreuse.

I.4.5.5. Attaque des sulfates

Wild et al. [142] ont trouvé une amélioration de la résistance aux sulfates pour les mortiers contenant de la brique calcinée à des températures supérieures à 800 °C, toutes les valeurs d'expansion sont bien inférieures à 0,5% après 720 jours d'exposition à la solution de sulfate de sodium et aucun signe de fissuration ou de désintégration n'est apparu**.**

I.5. Conclusion

Cette étude bibliographique a été menée pour mettre les points sur l'utilisation des déchets et leurs effets sur les caractéristiques et les performances des mortiers et bétons à l'état frais et durci.

Dans ce chapitre de la revue bibliographique nous avons concentré notre recherche sur l'intérêt de l'incorporation des poudres de verre (PV) et de la brique calcinée (PB) en tant que matériaux cimentaires supplémentaires dans l'amélioration des performances des bétons.

La réutilisation des déchets de verre en tant que matériau pouzzolanique est l'une des solutions proposées qui permet de recycler une grande quantité du verre, minimiser l'espace réservé aux décharges, et économiser de l'énergie et de l'argent.

La littérature examinée a rapporté que la présence de verre comme poudre en remplacement du ciment dans les mélanges de bétons/mortiers offre un avantage en termes de l'ouvrabilité, la résistance à la compression, l'absorption et la réaction alcali-silice. De plus, l'ajout de déchets de verre en poudre peut également augmenter la résistance aux chlorures, l'attaque au sulfate et la résistance au gel-dégel.

La brique d'argile cuite est une autre source de matériaux pouzzolanique dans les systèmes cimentaires, car elle permettrait de réduire la quantité de CO_2 émise dans l'atmosphère et peut améliorer la durabilité du matériau produit. L'effet avantageux du PB dans le béton est dû à son effet pouzzolanique, l'accélération de l'hydratation du ciment et à son effet de remplissage entre les grains de ciment et granulats.

D'après la littérature, toutes les études expérimentales ont été réalisées sur la Poudre de verre ou la poudre de brique seule, il n'y a aucune étude relative à la combinaison entre ces deux matériaux. De plus, peu d'études ont été réalisées sur l'effet de la finesse de la poudre de verre et la poudre de brique calcinée sur le comportement des MAP et BAP à l'état frais et durci. Cette recherche portera sur l'effet de la finesse et du taux d'incorporation de chaque ajout cimentaire seul et sur l'influence de la combinaison de ces deux ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des MAP écologiques. C'est l'objet de l'étude qui sera présentée aux chapitres IV et V.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS ET PROPRIÉTÉS DES BÉTONS ET MORTIERS AUTOPLAÇANTS

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS ET PROPRIÉTÉS DES BÉTONS ET MORTIERS AUTOPLAÇANTS

II.1. Introduction

Le BAP a été considéré comme un grand développement dans le domaine de la construction depuis sa première utilisation au Japon. Son introduction représente un progrès technologique qui a conduit à une meilleure qualité du béton et une augmentation de la productivité tout en assurant un environnement de travail améliorée sur site [143].

Pour lutter contre les problèmes causés par un béton mal vibré, le béton autoplaçantt (BAP) a été développé à l'Université de Tokyo en Japon vers 1988 par le professeur Okamura et ses étudiants [144]. Le concept BAP est donc né de la volonté de rendre le compactage du béton complètement indépendant du contexte de production, que ce soit dans le plan technique ou de main-d'œuvre. L'hypothèse principale du BAP est la réduction de gros agrégats et l'augmentation de la teneur en ciment avec l'introduction de superplastifiant (SP) pour conserver ses propriétés à l'état frais et son homogénéité [145].

Le BAP est donc un mélange à la fois fluide et homogène, qui remplit parfaitement les coffrages en s'écoulant sous l'effet de la seule gravité, et qui s'enroule complètement autour de toutes les barres d'armature sans provoquer un blocages ou séparation de grains à proximité [146].

Le BAP nécessite trois propriétés du béton à l'etat frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et une résistance à la ségrégation adéquate [147]. Cependant, il est communément admis que pour assurer ses trois propriétés, le BAP doit être conçu avec de faibles contraintes d'élasticité et des viscosités adéquates. Ceci est obtenu soit par l'incorporation d'une grande quantité de fines soit par l'ajout d'adjuvants modificateurs de viscosité [144].

L'un des inconvénients du BAP est son coût, associé à l'utilisation d'adjuvants chimiques et l'utilisation de volumes élevés de ciment Portland [148]. Cette particularité signifie que le BAP peut être considéré pas très écologique. Une solution aujourd'hui consiste à utiliser des matériaux aux propriétés résiduelles pour remplacer les matières premières traditionnelles utilisées pour fabriquer le BAP. Cela permettra de minimiser et de recycler ces déchets, ainsi que d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles et diminuer le rejet de CO_2 dus à une moindre utilisation de ciment Portland [149].

II.2. Composition des BAP

Les BAP se distinguent principalement des bétons ordinaires (BO) par un volume important de pâte de liant et un volume de gravillon plus faible. Il est nécessaire également que le liant, qui sert à substituer les graviers, contient un fort dosage en ciment et une teneur importante en addition minérale.

Ainsi, le volume et la dimension maximale (Dmax) des gravillons doivent être réduits pour Permettre une meilleure lubrification du système et un enrobage correct et suffisant des granulats par le mortier, ce qui permet d'éviter les phénomènes de blocage [150].

Cependant, il est primordial d'utiliser un adjuvant du type superplastifiant au BAP afin de garantir la fluidité recherchée.
D'autres composants chimiques tels que les agents colloïdaux, dits de viscosité, peuvent aussi être introduits afin d'éviter les problèmes de ségrégation et de ressuage, et d'assurer donc une meilleure stabilité au béton.

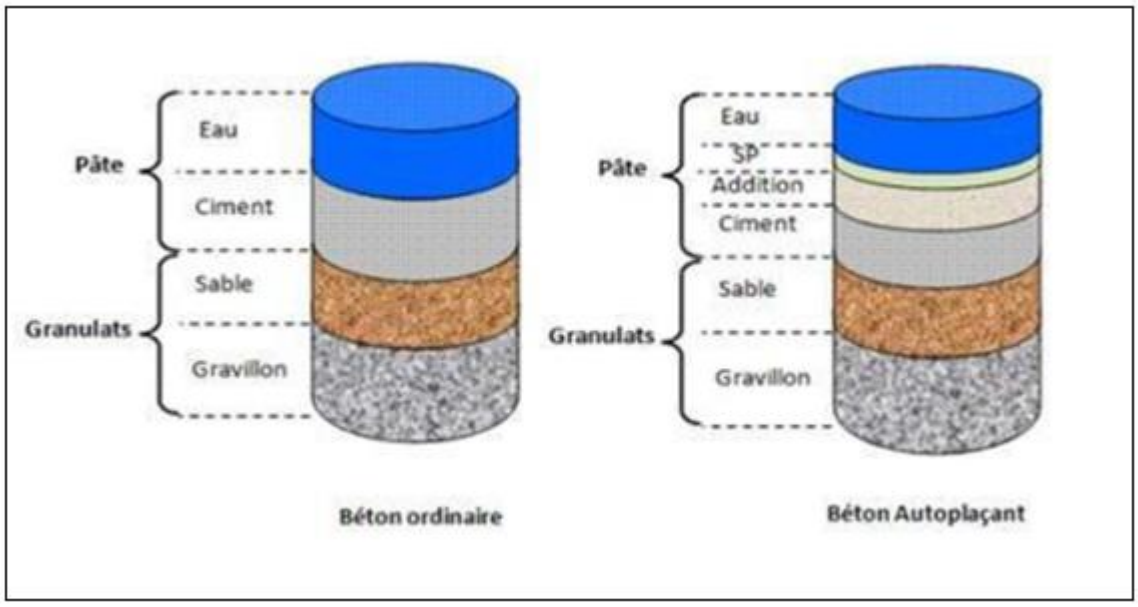


Figure II.1: Les composants de BO et BAP [151].

II.3. Formulations des BAP

La production de BAP (self compacting concrete SCC en anglais) avec une excellente maniabilité nécessite que des proportions de mélange appropriées soient conçues. Au fil des ans, un certain nombre d'approches de conception de mélanges différentes ont été proposées par des chercheurs de divers pays et les régions du monde [152].

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquit ces dernières années.

1I.3.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

La méthode japonaise développée par Okamura et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants [153]. Cette méthode est basée sur l'approche volumique et considère le béton comme un composé biphasique constitué de graviers et du mortier.

Elle préconise l'augmentation du volume de pate au détriment du volume des granulats, un faible rapport massique eau/liant et l'utilisation de superplastifiant [154].

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés :

$$G=\frac{50}{100}\ G_{lim}(1-A) \qquad \text{Eq :I.1}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier:

$$S=\frac{40(1-A-G)}{100\,(1-Ksf\ )} \qquad \text{Eq :I.2}$$

Où: K_{sf} = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%.

L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement. Ces deux grandeurs expriment la fluidité du mortier.

L'étalement relatif Γ_m, déterminé par un essai d'étalement au mini-cône à mortier (Fig.II.2), pour caractériser la fluidité ; s'exprime par la relation 1. 3 [154].

$$\Gamma m=(d^2-d_0^2)/d_0^2 \qquad \text{Eq :I.3}$$

où ; d est le diamètre de l'étalement de la galette du mortier en (mm), d_0 est la base du cône égale à100 mm.

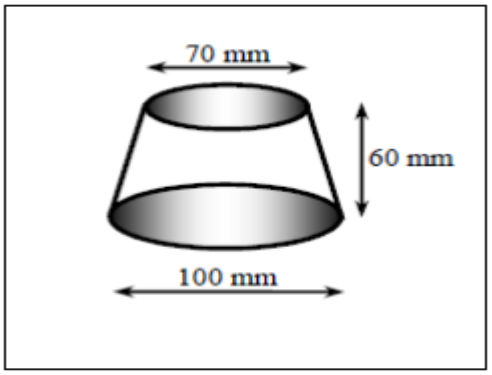


Figure II.2 : Dimensions de mini-cône destiné à l'étalement de mortier.

La vitesse relative d'écoulement Rm, déterminée par un essai d'écoulement au mini-entonnoir en V à mortier (Fig. II.3), pour caractériser la viscosité ; s'exprime par la relation :

$$R_m=\frac{10}{t} \qquad \text{Eq :I.4}$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

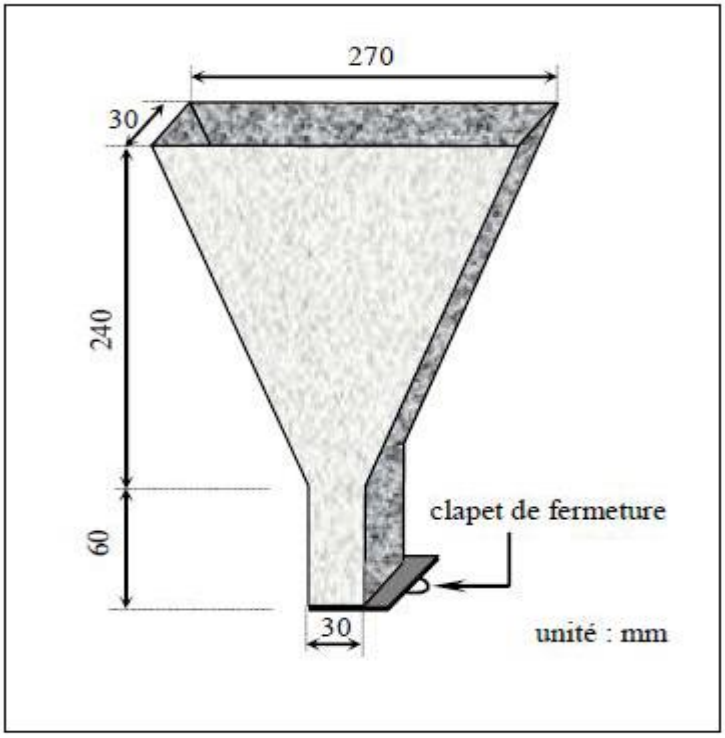


Figure II.3 : Dimensions de mini-entonnoir en V destiné à l'écoulement de mortier.

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de T_m est élevée, plus le mortier est fluide) et (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée). Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément T_m=5 et R_m=1±0,1. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

II.3.2. Formulation CBI (Suéde)

Proposée par Peterson et al, 1996 [155] La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par Tangtermsirikul et al, 1995 [156] En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type
de granulat.

II.3.3. Formulation CBI modifiée

La principale modification et extension de la méthode CBI est apportées par Bui et al. [157], qui ont proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats. Leur méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de la pâte autour des granulats du béton autoplaçant, grâce à une base de données importante de formulations de béton [158]. L'espacement moyen entre les particules varie selon les auteurs entre 0,3 et 1 mm**.**

II.3.4. Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran [159] est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.
Le modèle permet de prévoir :
-La compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente,
-les proportions du mélange,
-les distributions granulaires,
- la compacité propre.
Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.
La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).
- Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effets de paroi).
- La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante.
- Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaité et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto-plaçant sont atteints.

II.3.5. Formulation japonaise

La démarche proposée en 1998 par la société japonaise de génie civil [160] est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques. Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont :

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'auto compactibilité désirée. Il est situé entre 0.30 et 0.32 m^3/m^3 et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.
- Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 kg/m3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par m^3. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m^3.

II.4. Propriétés recherchées des bétons et mortiers autoplaçants

La rhéologie des bétons frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même. Les caractéristiques d'auto-compactage du BAP se traduisent par une qualité plus fiable de la mise en place du béton et une structure de matériau plus homogène ; l'objectif est de minimiser les espaces vides en béton et avoir une texture de surface uniforme, une durabilité améliorée, une résistance élevée et une construction plus rapide [161].

Un des avantages des bétons autoplaçants est d'améliorer la déformabilité du mélange afin qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité). En plus d'une ouvrabilité élevée on cherche aussi à améliorer la stabilité volumétrique des bétons autoplaçants.

En général, le critère de fluidité - stabilité est assez difficile à réaliser, mais, au moyen d'agents colloïdaux (agent de viscosité), des teneurs élevées en ajouts minéraux ou des teneurs appropriées en sable et en gros granulats, la stabilité et la déformabilité sont assurées. On entend par stabilité, la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage du béton.

La fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais.

II.4.1. Capacité au remplissage

Le remplissage du béton est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de deux dispositifs, le cône d'Abrams et l'Orimet (Tableau II.1).

Tableau II.1: Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage [162].

Propriété	**Essais à réaliser**
Capacité au Remplissage	▪ Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow). ▪ Temps à T50 au cône d'Abrams (T 50 Slump-Flow). ▪ Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel). ▪ Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test). ▪ Etalement au Tube Orimet (Orimet). ▪ Essai du caisson (Fill Box).

II.4.2. Capacité de Passage

Dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de gros granulats dans le béton, et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Donc, la capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage.

Le BAP doit posséder donc une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les confinements. Ceci nécessite une quantité de gravier inférieur à celle d'un béton ordinaire, et de taille maximale plus petite. La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de trois dispositifs, le cône d'Abrams en présence du J-Ring, la boîte en L (L-Box) et la boîte en U (U-Box) (Tableau II.2).

Tableau II.2: Essais permettant la détermination de la capacité de passage [162].

Propriété	**Essais à réaliser**
Capacité de Passage	• Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test). • Temps à T50 au cône d'Abrams en présence du J-Ring. • Différence d'Hauteurs au J-Ring. • Essai de la Boite en L (L-Box test) –Mesure de H2/H1. • Essai de la boite en U (U-Box test).

II.4.3. Résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [163].
La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façon différente, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation des BAP, il faut augmenter la cohésion entre les phases. Ceci est possible avec une pâte de rapport E/C réduit, ou l'utilisation d'un agent de viscosité.

II.4.4. Rhéologie

Pour mieux comprendre l'ouvrabilité du béton, de nombreux chercheurs s'intéressaient par la la rhéologie, qui est une science qui traite de l'écoulement de la matière.

La rhéologie est un outil efficace pour caractériser l'ouvrabilité, la consistance, la coulabilité, et prédire la stabilité, la pompabilité, la tirabilité, la pression du coffrage, la coulée multicouche.

Le terme de rhéologie a été proposé pour la première fois par Bingham en 1920 [164]. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est apparu nécessaire d'élaborer cette discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [165] avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe tel que : pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

La rhéologie du ciment et du béton principalement, implique l'évolution de la viscosité, de la plasticité et de l'élasticité des matériaux à base de ciment sous contrainte de cisaillement. Les propriétés rhéologiques ont une influence significative sur la construction, le formage ou le processus de moulage [166].

L'influence de la rhéologie et du débit sur le pompage sous pression du béton, variait du béton vibré conventionnel pompable à la ségrégation du béton autoplaçant. Il est clair que la rhéologie est un outil efficace pour caractériser la maniabilité, prédire le comportement d'écoulement, la stabilité et même la compactibilité de la pâte de ciment, du mortier et béton [167].

II.5. Facteurs influençant les propriétés des BAP et MAP à l'état frais

Les bétons et mortiers autoplaçants sont formulés de manière à obtenir un compromis optimal entre la fluidité et la stabilité. La considération des facteurs internes (la formulation du BAP ou du MAP, la nature et le dosage des matériaux utilisés) est nécessaire pour rendre possible l'obtention de ces propriétés pour le béton. En outre, les caractéristiques rhéologiques et les performances du BAP ou du MAP sont influencées fortement par les facteurs externes (impacts climatiques, transport, malaxage, etc.).

a. Volume de pâte

Le volume de pâte est souvent considéré comme un paramètre essentiel en ce qui concerne la consistance et les propriétés mécaniques [168]**.** L'aptitude au remplissage des bétons autoplaçants est fortement influencée par les frottements entre les granulats. Pour cela, les BAP doivent contenir un volume de pate (ciment + additions + adjuvants +eau efficace + air) important, de l'ordre de 330 à 400 l/m^3.

Des études menées par Khayat et al.[169] rapportent que le volume de pâte doit être important dans les formulations de BAP. La pâte a pour rôle de séparer les graviers en limitant les frottements entre eux, ainsi d'empêcher la formation de voutes susceptibles de bloquer l'écoulement. D'autre part, une étude faite par Girish et al.[170] a relevé que l'augmentation du volume de pâte dans la composition des BAP engendre une augmentation de la fluidité. D'autres études [171] ont reporté que le volume de pâte dans un BAP doit représenter 35 à 45% du volume total, alors que dans un béton traditionnel, il est de l'ordre de 20 à 35%, et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

b. Volume des granulats

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton.

Selon Okamura et al. [155,173] le volume des gros granulats dans le béton est un facteur à prendre en considération lors de la formulation d'un BAP. Ils mentionnent que la teneur en gros granulats doit être limitée afin d'augmenter la résistance à la ségrégation du béton frais. Par ailleurs, la quantité de sable contenue dans le mortier ne doit pas être trop importante puisque cela augmente la viscosité du mélange. Cependant, cette dernière doit être relativement faible pour que le BAP ou le MAP s'écoule avec un débit important. En général, ces exigences conduisent à adopter un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 pour les BAP [169,154].

La fluidité et la stabilité des BAP sont considérablement influencées par la granulométrie des granulats. En effet, Plus un granulat est petit, plus la demande en eau est importante.

L'augmentation du diamètre maximal des granulats entraine des risques de blocage dans un milieu confiné. La limitation de dimensions des granulats est aussi importante que leur volume. En général, ce diamètre est compris entre 10 et 20 mm dans les BAP [153]. Selon Petersson et al.[173], il est conseillé que le diamètre D_{max} des granulats reste dans la limite de 20 mm afin d'éviter tout risque de blocage du béton par les armatures lors du coulage (FigureII.4).

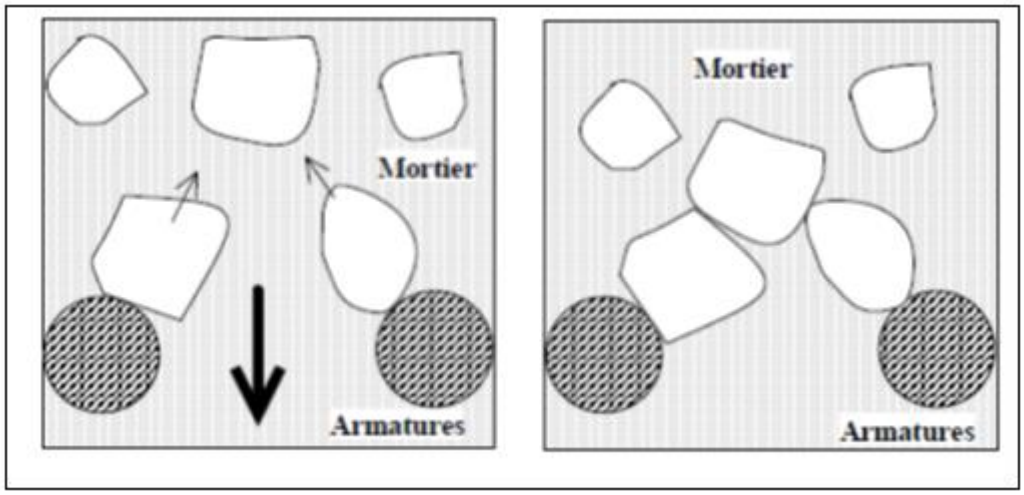


Figure II.4 : Blocage des granulats au droit des armatures [168].

En ce qui concerne la forme des granulats, l'utilisation de granulats roulés conduisent à la diminution de la viscosité des bétons et par conséquent l'obtention d'un mélange plus maniable. Cela a été expliqué par de deux phénomènes : l'effet de roulement à billes les unes sur les autres et la faible surface spécifique d'une sphère [174]. Cependant, pour des mélanges à grains anguleux, les réactions d'encombrement sont très élevées, du fait de la grande difficulté que rencontrent ces grains à se mouvoir les uns par rapport aux autres [175].

c. Utilisation des additions minérales

Les bétons et mortiers autoplaçants sont des matériaux très spéciaux dont les caractéristiques résident essentiellement dans leurs grandes fluidités tout en limitant les risques de ségrégation et ressuage.

Les BAP et MAP sont caractérisés par la présence d'une grande quantité de fines comparées à celle d'un béton ou mortier ordinaire. L'étude de l'effet des divers ajouts minéraux sur la formulation et les propriétés des bétons autoplaçants a été l'objectif de nombreuses recherches.

Ces additions sont généralement utilisées dans le but de diminuer le cout du béton ou pour améliorer la continuité du squelette granulaire et ainsi réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation. Parmi les ajouts minéraux les plus utilisés : les filaires calcaires, les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle. Ces particules ultrafines, de granularités inférieures à celle du ciment ont une action à la fois :

Physique par un effet granulométrique ou les grains s'insèrent entre ceux du ciment et permettent une diminution du dosage en eau du fait de l'accroissement de la maniabilité, effet de diminution de la perméabilité et de la capillarité.

Chimique : pour les particules siliceuses qui présentent une réactivité, liée à leur caractère pouzzolanique, par l'association de la silice et de la chaux libérée par le ciment.

d. Dosage en eau

En plus de son rôle majeur dans le phénomène d'hydratation, l'eau est un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau conduit à une augmentation de la fluidité de béton et entraine la diminution de la concentration en solides. Au niveau rhéologique, cet apport d'eau conduit à une meilleure lubrification. Il en résulte une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité des bétons ou des mortiers (du fait de l'éloignement des particules et la réduction des frictions lors de l'écoulement) [176] .Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais [177].

e. Utilisation des adjuvants

Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage pour améliorer les caractéristiques du béton (fluidité, plasticité, propriétés rhéologiques). Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité [178].

Les superplastifiants (haut réducteurs d'eau) sont des polymères hydrosolubles dont la synthétisation réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaines de molécules de masses moléculaires élevées. Les superplastifiants permettent de diminuer la quantité d'eau de gâchage tout en ayant une bonne maniabilité du béton à l'état frais lors de sa mise en œuvre. Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface ciment-eau (Figure II.5). Ils permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et /ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaines moléculaires très longues [179]. La répulsion des grains de ciment conduit à la libération de l'eau initialement piégée entre les flocs, ce qui permet de fluidifier le mélange.

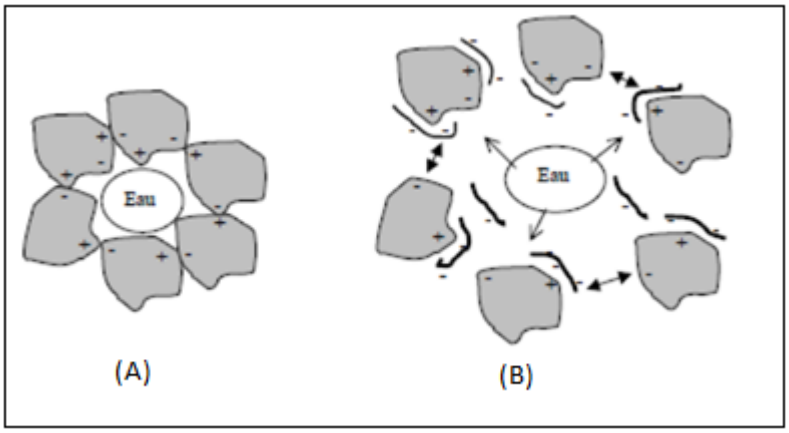


Figure II.5 : A : Etat initial (Avant l'action du superplastifiant) B : Défloculation des grains de ciment [180].

Cependant, les fortes proportions en superplastifiant (proche ou supérieur au dosage de saturation) peuvent engendrer une baisse de la viscosité de la pâte de ciment et donc du béton.

Cette diminution de la viscosité expose le béton, lorsqu'il est soumis à un écoulement (notamment lors de son pompage ou de sa mise en place), à des phénomènes d'instabilité et de ségrégation. C'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. Cependant, ils augmentant la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiant [181].

Manai [182] a étudié l'effet de l'incorporation d'un agent colloïdal (dosage variant de 0 à 0,05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1,2 à 3% de la masse de liant) sur un mortier. Les résultats ont montré que le ressuage était nul pour les mortiers contenant une teneur en agent colloïdal dépassant les 0,03%. Selon l'AFGC [168], pour les bétons ou mortiers ayant des rapports eau /liant élevés, l'utilisation des agents viscosant s'avère nécessaire car les fines ne seraient pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

La complexité des propriétés visées et des matériaux employés démontre la nécessité de trouver un compromis lors de la formulation d'un BAP. Différents auteurs se sont intéressés à cette étude et ont proposé des méthodes de formulation de BAP.

II.6. Caractérisation de BAP et MAP à l'état frais

Les mélanges autoplaçants sont conçus pour avoir des propriétés fraîches qui ont un degré d'ouvrabilité plus élevé que les bétons ordinaires. L'ouvrabilité est un moyen décrivant les performances du béton à l'état plastique et pour le BAP, l'ouvrabilité est souvent caractérisée par les propriétés suivantes :

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).
- La mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- La stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

Un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un béton autoplaçant. C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l'opérateur.

II.6.1. Essai d'étalement (Slump flow)

C'est l'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la fluidité du béton. L'essai consiste à mesurer l'étalement au cône d'Abrams. On place en une seule fois un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée. Ensuite on enlève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton.

En effet, la valeur de l'étalement est donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires. Il nous renseigne sur la déformabilité du béton [183].

La norme NF EN 206-9 prévoit une répartition des BAP en trois classes (Tableau II.3) [183] .

Tableau II.3. Classe d'étalement [183].

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

II.6.2. Essai à la boite en L (L-Box)

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferraillage. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1. Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8.

II.6.3. Essai d'entonnoir (V-Funnel)

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des BAP. La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante, l'entonnoir dont les dimensions définies est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé.
Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du béton. Si le béton s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible.
L'EFNARC [EFNARC 2005] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) :

- Tv ≤ 6 secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et
- 9 ≤ Tv ≤ 25 pour les autres cas.

II.6.4. Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de la boite en L.

Cet essai consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance d'un échantillon de béton (4,8 ± 0,2 kg) passant à travers un tamis de 5 mm, et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance**.**

On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$Pi = \frac{Plaitance}{Péchantillon} * 100 \qquad \text{Eq :II.1}$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0% < P Laitance< 15 % : Stabilité satisfaisante
- 15%< P Laitance< 30 % : Stabilité critique
- P Laitance> 30% : Stabilité très mauvaise

Ces essais permettent d'avoir une vision qualitative des BAP [184].

II.7. Caractérisations des BAP et MAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants qui est représentés dans la qualité de squelette granulaire, le rapport E/C et la composition du liant conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons tels que (la résistance à la compression et à la traction par flexion) et plus particulièrement les déformations instantanées et différées (Module d'élasticité, retrait, fluage) supposées différentes de celles des bétons vibrés.

II.7.1. Résistance à la compression

Les résistances mécaniques projettent généralement une image globale de la qualité d'un béton. La résistance à la compression d'un BAP est directement liée à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition et du dosage du liant. Les BAP se caractérisent par une résistance à la ségrégation plus élevée comparé au BV. Par conséquent, ils possèdent une structure plus homogène et plus compacte ce qui améliore la résistance mécanique.

D'après Klug et Holchemacher [185], les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment comparées à celles des bétons ordinaires. Selon Domone [186], le type et la proportion d'addition utilisée influencent la résistance à la compression. Felekoglu et al. [187] ont montré que la variation des résistances en compression des BAP dépend aussi de la nature et du dosage du liant.

La surface spécifique des additions minérales peut avoir un rôle prédominant dans l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons. En effet, Nguyen et al. [188] ont constaté que la finesse de la pouzzolane naturelle affecte significativement l'activité pouzzolanique. Les résultats obtenus ont confirmé que cette dernière augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de l'addition.

II.7.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction est l'une des propriétés fondamentales du béton. Elle peut être considérée comme un paramètre intéressant dans le calcul et la conception des dalles d'autoroutes et d'aérodromes, résistance au cisaillement et résistance à la fissuration.

La composition particulière des bétons et mortiers autoplaçants peut entraîner des variations de résistance à la traction. Ces variations peuvent être expliquées par la qualité de la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition liées à la nature ou bien à la finesse des fines. Les rapports entre la résistance à la traction et celle à la compression des BAP ou MAP peuvent différer de ceux des bétons ordinaires.
Turcry [189] démontre que, pour une même résistance à la compression, le BAP et le BO ont une même résistance à la traction.

Selon Pineaud [190], la résistance à la traction des BAP est plus grande que celle des BV (de l'ordre de 10%). Les auteurs ont expliqué ce résultat par la qualité de l'interface pâte-granulats qui est considérée meilleure dans les BAP et par la faible proportion de granulats qui diminue le risque de propagation des premières fissures. De même, Klug et Holschemacher [185] ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances aux tractions élevées comparées à celles des bétons traditionnels. Une amélioration de résistance pouvant aller jusqu'à 40% a été notée.

II.7.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique est le rapport entre la contrainte et la déformation qui lui correspond dans le domaine élastique. Ce paramètre est lié à la résistance à la compression du béton. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation du module d'élasticité [191]. Nassif et al.[192] attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carré de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé.

En outre, le module élastique du béton dépend des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif. Les BAP sont formulés de telle sorte à ce que le volume de la pâte soit plus important et les proportions granulaires plus faibles que les BV [195,196]. En effet, le module des BAP diffère peu de celui des BV si le rapport G/S est similaire et est inférieur à 1. Si le rapport G/S est plus élevé pour le BV que pour le BAP, il en découle des valeurs du module d'élasticité des bétons autoplaçants plus faibles que celles des bétons vibrés auxquels ils sont comparés.

II.7.4. Retrait

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physico-chimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. L'importance du retrait dans les structures en béton armé est essentiellement rattachée à la fissuration. La contraction ou l'accourcissement d'une pièce provoque des tensions internes qui tendent à s'opposer au changement de dimension. Cette opposition à la variation de dimension est due à des obstacles internes tels que les agrégats et les armatures. Les contraintes de traction qui résultent de ces obstacles et de ces gradients de déformation peuvent atteindre la résistance du béton à la traction et donc causer la fissuration du matériau. Ces fissures, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs, non seulement diminuent la capacité d'une structure à supporter la charge admissible, mais elles peuvent aussi affecter sa durabilité et nuire à sa bonne apparence. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton et les conditions extérieures de conservation. Le retrait du béton possède différentes origines d'où on peut distinguer les différents retraits qui caractérisent le séchage du béton : Retrait de dessiccation (séchage), Retrait endogène, Retrait plastique.

Le retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand. Il augmente aussi avec le volume de pâte [189]. Leemann et al. [195] ont constaté que le retrait des BAP est plus élevé comparé au béton témoin. Leur résultat a été expliqué par le volume de pâte qui est important dans le cas des BAP. Valcuende et al. [196] ont fait des observations similaires, indiquant que le retrait de dessiccation des BAP est plus important que celui du béton de référence.

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [187] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés , d'autres [193] contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [193].

Les bétons autoplaçants ont une composition qui les rend a priori plus sensibles à la fissuration de retrait plastique comparés aux bétons ordinaires. Des études [197] ont montré que l'amplitude maximale du retrait plastique des bétons autoplaçants est au moins cinq fois supérieure à celle des bétons conventionnels. Deux paramètres de composition peuvent expliquer cette différence : d'une part, les BAP présentent des rapports eau sur fines plus faibles ; d'autres parts, le fort dosage en superplastifiant des BAP retarde leur prise. Par conséquent, il est préférable d'utiliser une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Gram et Piiarinen [198] ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés .

II.8. Durabilité et propriétés de transport des MAP et BAP

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement.

Principalement dans le béton, plusieurs types de fluides peuvent pénétrer et mettre en péril sa durabilité, l'eau (pure ou chargée d'ions agressifs), le gaz carbonique ou l'oxygène.
La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant. Particulièrement, la présence des additions minérales peut modifier la structure poreuse des pâtes de ciment, mortiers ou bétons.

II.8.1. Porosité

Le béton ou mortier est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. La structure poreuse des bétons ou mortiers est constituée de pores capillaires et de pores d'hydrates (pores de gel). Les pores capillaires, les plus gros, influencent fortement les propriétés de transfert des bétons, surtout lorsqu'ils sont interconnectés. La porosité peut être divisée en fonction de sa position par rapport au milieu extérieur en 3 catégories [199]:

• Les pores interconnectés : ils forment un espace connecté dans le milieu poreux et participent au transport de la matière à travers le matériau.
• Les pores aveugles : ils sont interconnectés d'un seul côté et peuvent être accessibles à un fluide extérieur mais ils ne participent pas au transport de matière.
• Les pores isolés : ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

La porosité fermée (pores isolés) correspondant à l'ensemble des pores ou cellules fermées qui joue un rôle important vis-à-vis des propriétés mécaniques et thermiques. Cependant, elle n'est pas concernée par les phénomènes d'écoulement. La porosité accessible (pores interconnectés et pores aveugles) est responsable du processus de transport de la pâte de ciment durci et sa vulnérabilité face aux agents agressifs.
Le rapport E/C influence considérablement la porosité du béton. Plus le rapport E/C est élevé plus la porosité est importante, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores [200]. Les résultats de certaines études montrent que la structure des pores dans le BAP, y compris le volume total des pores, la distribution et le diamètre des pores, est très similaire aux bétons à haute performances (BHP). Par rapport à un béton ordinaire, la microstructure du BAP est signalé à être plus dense [201].

II.8.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est l'un des mécanismes de transfert de l'eau dans les matériaux poreux. Ce phénomène résulte des tensions de surface dans les capillaires. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton dépend de la structure poreuse du matériau (porosité ouverte, taille et interconnexion des pores) et de la vitesse d'absorption par remontée capillaire (sorptivité) qui dépend elle-même de l'état hydrique du matériau.
Les spécificités de composition des BAP (volume de pâte élevé, présence d'additions minérales) pourraient les conduire à avoir une valeur d'absorption d'eau différente de celle des bétons courants. Zhu et Bartos [202] ont montré que pour la même classe de résistance, l'absorption capillaire des bétons autoplaçants est significativement plus faible que celle des bétons vibrés.

II.8.3. Résistance au feu

Les incendies concernant des ouvrages en béton depuis les vingt dernières années sont en nette augmentation. Lors de ces incendies, les structures ont subi d'importants dégâts (endommagement mécanique, d'importantes fissurations et des détachements de matière des voussoirs sur certaines parties). Tout cela implique des coûts de réparations importants ainsi qu'une immobilisation de la structure [203].

Tous ces éléments démontrent que les hautes températures causent d'importants dommages sur les bétons qui conduisent à une modification de ses propriétés. Les mécanismes de dégradation du béton à haute température ne sont pas encore bien compris.

Les modifications subies simultanément par la matrice cimentaire et les granulats engendrent une forte dégradation de la microstructure du béton. Outre les effets directs de modifications de ces deux composants élémentaires, les incompatibilités de comportement de ceux-ci engendrent des dégradations spécifiques au matériau béton.

Mais parallèlement à ces principales modifications, les autres constituants de la pâte de ciment subissent des transformations au cours du traitement thermique. Castelotte et al. [204] proposent une évolution de la composition de la pâte au cours d'un échauffement grâce à la technique de la diffraction de neutrons (Voir figure II.6).

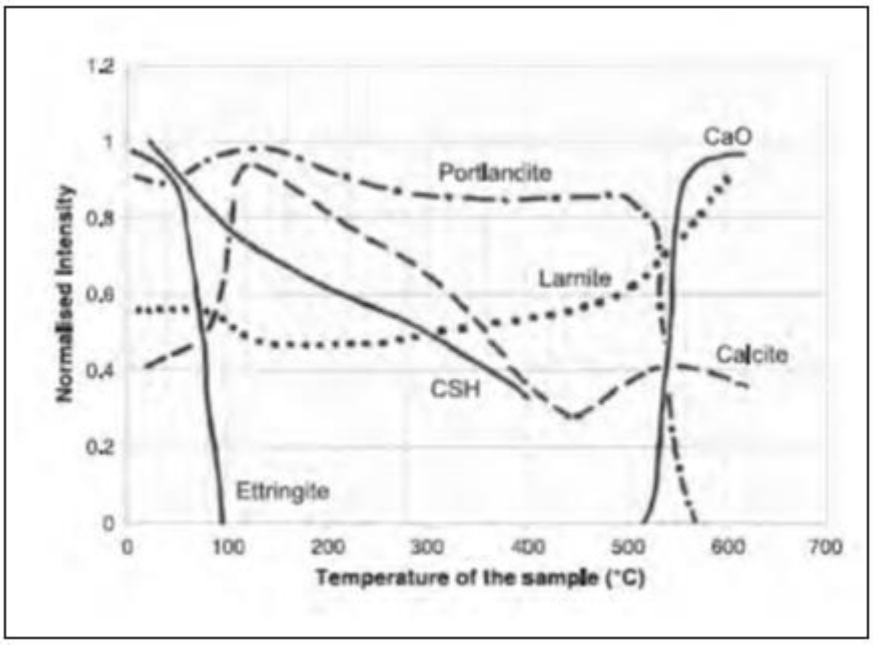


Figure II.6 : Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique [204].

Dès le début du chauffage, les hydrates du ciment subissent des modifications. Les auteurs observent que la disparition de l'ettringite se produit avant 100˚C, avec une déshydratation progressive des C-S-H jusqu'à 600˚C. A 500˚C, la portlandite se décompose en CaO et en eau. Cette transformation s'appelle la déshydroxylation. Finalement, la déshydratation reste le principal phénomène lorsqu'un béton ou une pâte de ciment subit un traitement thermique.

Les granulats possèdent un comportement diffèrent de la pâte de ciment avec l'élévation de la température. Différents types de granulats peuvent être utilisés : calcaire, siliceux, silico-calcaire, grés, basalte, argile expansé . Ces différents types de granulats peuvent avoir des comportements différents à haute température selon leur composition.
Avec une élévation de température, les granulats subissent des modifications physicochimiques. C'est essentiellement la structure minérale qui est modifiée avec la température.

Tous les éléments constituant le béton subissent avec la température des modifications physiques et chimiques. Concernant la matrice cimentaire et les granulats, des comportements opposés sont observés. Au-delà de 105°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Ce comportement opposé engendre une microfissuration [205].

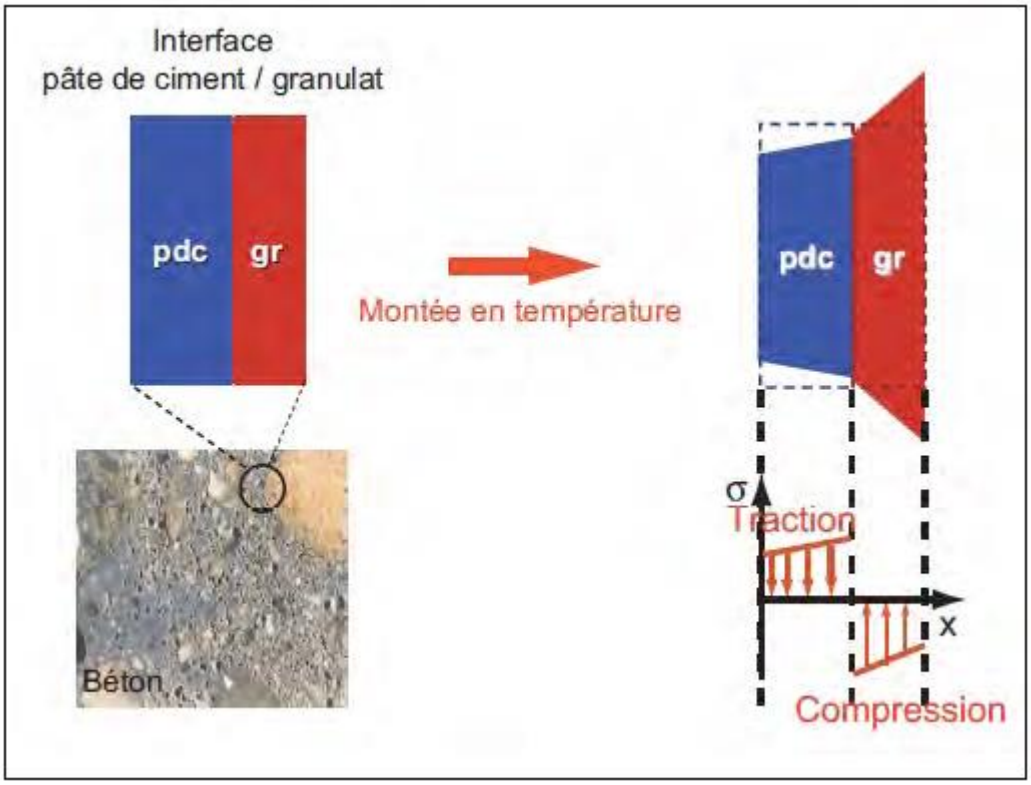


Figure II.7 : Mécanismes liés aux incompatibilités pâte -granulat [206].

Ces deux évolutions créent à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations induisant des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et de compression au sein des granulats (Voir figure II.7). Les auteurs [207] constatent que la déformations thermiques des bétons composés de granulats légers sont les plus faibles, tandis que celles des granulats siliceux les plus importantes (Facteur 4 entre les 2 extrêmes) (Voir figure II.8).

Donc, la nature du granulat a une incidence sur la déformation thermique, et par conséquent sur l'incompatibilité pâte -granulats.
Parallèlement à cette incompatibilité, les hautes températures entrainent le départ d'eau (libre, liée, adsorbée) contenue dans les pores et dans les hydrates. Or, au niveau de l'auréole de transition, cette deshydratation détériore rapidement les liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment. Cela entraine l'apparition de microfissures.

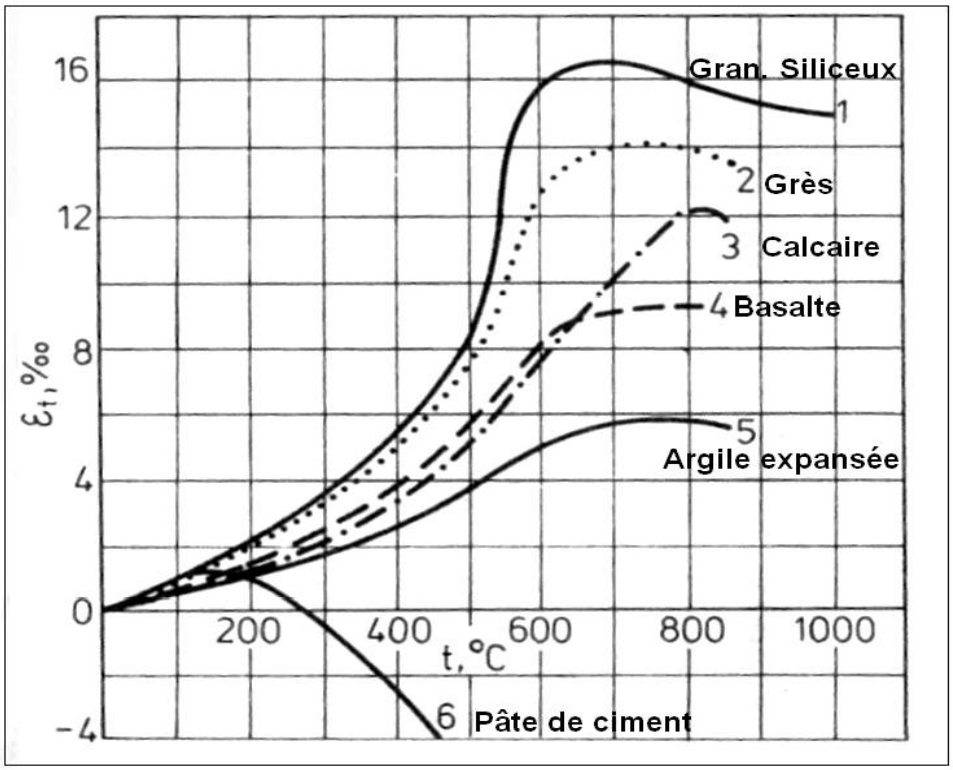


Figure II.8 : Déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats [207].

Depuis l'apparition des BAP, plusieurs études ont été menées sur la durabilité de ces bétons, Cependant, peu d'études ont été menées sur le comportement des BAP à haute température.

D'après le rapport de RILEM en 2008 sur la durabilité des BAP [201], la résistance au feu des bétons autoplaçants est similaire à celle des bétons ordinaires. A cause de la faible perméabilité du BAP, la Résistance au feu peut être considérable, selon Persson [208], l'utilisation des fibres polypropylène a été bénéfique aux BAP car ils contiennent des pores qui permettent l'emprisonnement des fumées.

Finalement, ces essais ne permettent pas de montrer clairement une différence entre BV et BAP. Néanmoins, à 800°C, la résistance à la compression des BAP est quasiment nulle. Cela s'explique par la décarbonatation du calcaire contenu dans les fillers calcaires qui a lieu vers 750°C. Mais, les paramètres de formulation comme le volume de pâte conduisent à une modification de la résistance [184].

II.9. Application des BAP et MAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Le Japon a utilisé du béton auto-plaçant (BAP) dans la construction de ponts, de bâtiments et de tunnels depuis le début des années 1990. Au cours des dernières années, un certain nombre de ponts BAP ont été construits en Europe. Aux États-Unis, l'application de BAP dans la construction de ponts routiers est très limité pour le moment.

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en oeuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

- Des densités de ferraillage importantes.
- Des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc.
- Des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc.
- Des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Des exigences architecturales et de qualité des parements particulières.
- Des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration [209].

II.9.1. Application des BAP et MAP en Algérie

A notre connaissance et à ce jour aucun ouvrage n'a été construit en utilisant le BAP sachant qu'au niveau de la réglementation ce dernier n'est pas encore normalisé. Néanmoins, il peut y avoir quelques cas de construction où le béton adjuvanté a été utilisé en introduisant soit des plastifiants soit des superplastifiants mais pas pour autant que ça soit du béton autoplaçant. Ce type de béton repose encore sur des compétences développées au sein de l'Université Algériennes par plusieurs chercheurs aux réalisations différentes, dont nous citons quelques études :

Boukendakdji [210] a étudié l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés des BAP par l'introduction de laitier algérien d'EL-Hadjar comme ajouts cimentaires avec une finesse comparable à celle du ciment. Deux types de SP ont été utilisés l'un à base de polycarboxylate (PC) et l'autre à base Polynaphtalène Sulfonate (PNS). Il a trouvé que 20% de laitier peut donner un bon BAP sans ressuage ni ségrégation, de plus il a observé que le superplastifiant PC est plus efficace que le superplastifiant PNS du point de vue ouvrabilité et rhéologie.

Benabed [211] a analysé l'influence de différents types de sable avec des morphologies différentes sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité des BAP. Plusieurs types de sable ont été utilisés sable concassé (SC), sable alluvionnaire (SA), sable dunaire (SD) et un mélange binaire ou ternaire de ces sables, il a observé que les performances rhéologiques et mécaniques de mortiers et bétons à base des sables binaires concassés et alluvionnaires sont meilleures que celles obtenues en utilisant des sables binaires concassés et dunaires essentiellement pour des teneurs plus élevées en sable de dunes.

De point de vue résisance mécanique l'utilisation de sables binaires et ternaires a eu un effet positif sur amélioration de la résistance à la compression à condition que la quantité sable de dune ne dépasse pas 25%. Cependant, l'incorporation de sable de dunes diminue la résistance aux attaques des acides et des sulfates.

Belaidi [212] a examiné l'influence de la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP. Il a montré que dans les systèmes binaires, une amélioration de l'ouvrabilité a été observée jusqu'à 15% du remplacement par la pouzzolane naturelle. Dans les systèmes ternaires, l'utilisation de 5% à 30% de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle améliorent les propriétés rhéologiques des BAP. Pour les résistances mécaniques, elles diminuent avec les mélanges binaires seuls ou bien pour les mélanges ternaires.

Safi et al. [213] ont utilisé les déchets plastiques comme granulats fins à la place de sable dans la fabrication des mortiers autoplaçants. Le sable a été remplacé par les déchets plastiques aux dosages 0%, 10%, 20%, 30% et 50% en poids du sable. Les résultats trouvés ont montré une amélioration de la fluidité par l'inclusion des déchets plastiques. Cependant, une réduction de la résistance à la compression de 15% et 33% pour les mortiers contenant 20 à 50% de déchets plastiques respectivement est observée.

Bouziani [214] a proposé une approche de modélisation de conception de mélange des BAP avec plusieurs types de sable : sable de rivière (SR), sable concassé (SC) et sable de dune (SD) en proportions binaires et ternaires. Les résultats indiquent que la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours augmentait avec l'augmentation de la proportion de SC et diminuaient avec l'augmentation de la proportion de SD dans les systèmes binaires et ternaires.

Boucetta [215] a étudié l'influence de l'incorporation des additions minérales et industrielles telles que filler de calcaire, laitier granulé de haut fourneau et de la poudre de verre sur les comportements des BAP aux états frais et durcis. Le ciment a été remplacé par des taux de substitutions différentes. Les résultats obtenus montrent des performances rhéologiques prometteuses et ceci même pour un fort dosage de 60% par rapport à la masse du ciment. Pour la durabilité l'emploi du laitier et de la poudre de verre comme addition, réduit considérablement la pénétration des ions chlorure.

Haddadou et al.[216] ont comparé les propriétés du BAP témoin et du BAP renforcé par des fibres d'acier avec un volume de 30% de poudre de marbre. Les résultats trouvés ont montré une diminution de la maniabilité avec l'augmentation de la teneur en fibres d'acier. Par contre les propriétés mécaniques sont améliorées par l'incorporation de fibres d'acier dans les BAP, en particulier la résistance à la traction et la résistance à la flexion.

A. Boukhelkhal et al. [217] ont étudié l'effet de l'incorporation de la poudre de marbre (PM) comme matériaux cimentaires supplémentaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP. Le ciment est partiellement remplacé par PM à 5, 10, 15, et 20 %, un rapport E/P et un dosage en SP fixé à 0,4 et 0,9%. Les résultats ont montré que l'utilisation de la poudre de marbre dans le BAP améliore leurs comportements rhéologiques, tandis que les résistances mécaniques diminuent.

Ghernouti et al.[218] ont examiné l'effet des fibres des sacs plastiques (FSP) sur des propriétés frais et durcis du BAP. Dans cette étude les mélanges ont été préparés en faisant varier la longueur des fibres plastiques (2, 4 et 6 cm) avec différents niveaux d'incorporation (1, 3, 5 et 7 kg/m3). Les résultats montrent que les mélanges à base de FSP d'une longueur de 2 cm répondaient aux critères du BAP quelle que soit la teneur en fibres.

Tandis que l'augmentation de la longueur du FSP au-dessus de 4 cm provoque le blocage en milieu confiné. Pour les résistances mécaniques ils ont trouvé que l'incorporation de FSP n'a pas un effet significatif sur la résistance à la compression et à la flexion, alors qu'il a un effet important sur la valeur de la résistance à la traction à 28 jours.

Irki et al. [219] ont fait une recherche sur l'effet des fibres d'acier (FA) ondulées avec différentes longueurs 35, 40 et 50 ± 2 mm et différentes fractions volumiques 0,3, 0,5, 0,8, 1, 1,2 et 1,4 % sur le comportement du BAP. Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de FA avec une teneur plus élevée et une longueur plus importante diminue la maniabilité du BAP, réduit sa capacité de passage et de remplissage, et augmente le risque de blocage. La résistance à la compression diminue avec l'augmentation en pourcentage et la longueur de FA. Contrairement à la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité augmentent avec l'augmentation du pourcentage et des longueurs de FA.

Salhi et al. [220] ont présenté une étude des propriétés et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) en climat chaud .Cinq méthodes de cure ont été appliquées sur le BAP en faisant varier la durée et les conditions de conservation du BAP. Les résultats obtenus sur la résistance à la compression montrent que la période de cure initiale à l'eau de 7 jours suivie d'une maturation en climat chaud est meilleure par rapport aux quatre autres méthodes de traitement de cure. D'autre part, le climat chaud a aggravé les propriétés du béton frais et durci. De plus, il diminue généralement sa résistance à la compression.

Omrane et al. [221] ont étudié les propriétés rhéologiques , mécaniques et de durabilité du BAP avec des granulats de béton recyclé (GBR) et de la pouzzolane naturelle (PZ). Les niveaux de substitution en poids des matières grossières et fines granulats naturels par des granulats fins et grossiers recyclés ont été fixés à 0%, 50%, 75% et 100%, le ciment a également été partiellement remplacé en poids de 5% à 25% de PZ. Les résultats indiquent la possibilité d'utiliser 50 % de granulats grossiers et fins recyclés pour réaliser des bétons autoplaçants.
Les mélanges de GBR contenant du PZ développent des résistances à la compression comparables à celles des mélanges sans PZ à 120 jours. L'incorporation de 15% et 20% de PZ dans les granulats de béton normal (GRN) a réduit la profondeur de pénétration des ions chlorure à 50% et a également diminué la perte de masse sous l'attaque d'acide sulfurique.

Irki et al. [222] ont analysé l'effet de traitement des fibres végétales sur le comportement de mortier autoplaçant (MAP). Les fibres végétales ont été utilisées dans les MAP avec une longueur de 20 ± 2 mm et des proportions différentes (0,5- 1-1,5- 2- 2,5 et 3%) par volume de mortier. Les formulations optimales doivent utiliser des fibres traitées à 3% avec (10% NaOH + résine époxy). Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression jusqu'à 20% et la résistance à la traction jusqu'à 40% pour les MAP fibrés traitées à base d'alcali-résine. Ils ont montré également que le traitement alcali-résine améliore l'adhérence fibre-matrice.

Bensaci et al. [223] ont étudié l'effet des granulats de caoutchouc des pneus recyclés sur les performances du BAP. Des particules de caoutchouc de 0-2mm de pneus en substitution partiel du volume total de sable à différents pourcentages (5, 10, 15, 20 et 30%) ont été ajoutées aux mélanges du BAP.

Les résultats obtenus ont montré que l'inclusion du caoutchouc dans le BAP diminue l'ouvrabilité, réduit sa capacité de passage et augmente la possibilité de blocage. L'augmentation du taux de caoutchouc entraine une diminution de la résistance à la compression. Par contre, l'incorporation des granulats de caoutchouc améliore d'une façon remarquable la conductivité thermique.

Kouider Djelloul et al. [224] ont examiné l'effet des granulats de béton recyclés (GBR) sur les propriétés frais et durcis du béton autoplaçant (BAP) contenant du laitier granulé de haut fourneau en remplacement du ciment. La substitution volumique du sable par les granulats de béton recyclés est de (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %) pour chaque groupe de mélange, chaque groupe contient 0, 15 % et 30 % de laitier granulé comme remplacement du ciment en poids. Les résultats montrent que l'utilisation combinée de granulats de béton recyclés et de laitier a eu un effet significatif sur les propriétés frais et durcis du BAP. L'ajout de granulats fins et grossiers recyclés en substitution jusqu'à 50% des granulats naturels améliore l'ouvrabilité des mélanges, tandis que l'ajout de 50 à 100% diminue l'ouvrabilité, quelle que soit la teneur en laitier utilisé en remplacement du ciment. De plus, une diminution de l'absorption d'eau capillaire et de la profondeur de perméabilité à l'eau a été constatée lors de l'utilisation de mélanges GBR avec du laitier.

D. Boukhelkhal et al. [225] ont étudié l'effet de la température de durcissement et des additions minérales à savoir la poudre de calcaire (PC), le laitier de haut fourneau granulé (LG) et la pouzzolane naturelle (PN), sur les propriétés physico-mécaniques du BAP. Les BAP sont exposés à différentes températures de durcissement (20, 40, 60 et 80°C). Les résultats montrent que l'augmentation de la température de durcissement entraîne une amélioration des performances du BAP à court et à long terme. Cependant, la température de 40°C est considérée comme la température de durcissement optimale pour rendre le BAP économique et à haute performance.

Benyahia et al. [226] ont étudié le comportement des MAP de réparation à base de pouzzolane naturelle en climat chaud. Les résultats obtenus ont prouvé qu'il est possible de produire des matériaux de réparation compatibles dans cet environnement chaud en utilisant jusqu'à 30 % de pouzzolane naturelle en remplacement du ciment blanc.

Sahraoui et Bouziani [227] ont contribué avec une étude sur l'influence de différents types et proportions de sables sur les propriétés rhéologiques et durcies du BAP. Pour cette étude trois sables en combinaisons binaires et ternaires ont été utilisés : sable rivière (SR), sable concassé (SC) et sable de dune (SD). Les résultats ont montré que l'augmentation des proportions SD et SC dans les mélanges binaires ou ternaires avec SR ont conduit à une diminution significative de la fluidité et que la plus faible valeur du seuil de cisaillement (environ 44 Pa) a été obtenue pour un mélange à dosage de 30% de SR, 40% de SC et 30% de SD. Ainsi, la résistance mécanique à la compression à 28 jours augmente avec l'augmentation de la proportion SC et diminue avec l'augmentation de la proportion SD dans des mélanges de sable binaires et ternaires.

Skender et al. [228] ont utilisé le filler calcaire (FC) comme remplacement alternatif du ciment et du sable, et ont vu son influence sur les propriétés frais et durcis du BAP. Le ciment et le sable ont été substitués avec 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 % de filler calcaire. Les résultats montrent que l'incorporation de FC jusqu'à 20% en remplacement partiel du sable et du ciment a conduit à des propriétés appréciables à l'état frais. Néanmoins, à l'état durci, à 15% de remplacement du sable, une augmentation de la résistance à la compression et une diminution de la diffusion de l'eau et des ions chlorures sont observées, tandis qu'une augmentation de la perméabilité à gaz a été enregistrée. Pour le remplacement du ciment, 5% de filler calcaire donne une amélioration de la résistance à la compression et de la diffusion des ions chlorures par contre la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz diminuent pour 15% de substitution.

Hadj aissa et al. [229] ont examiné l'influence de tuf calcaire comme remplacement du sable et du ciment dans la fabrication du BAP. Dans cette étude les mélanges sont préparés avec trois différents ratios sable /mortier (S/M) de 0,40, 0,45 et 0,50 avec une teneur variable en superplastifiant (SP). Le ciment a été remplacé par des fines de tuf calcaire (TC) avec des pourcentages de 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30%. Les résultats montrent que l'utilisation de TC améliore la fluidité et la stabilité des BAP. La résistance maximale à 28 jours était obtenue avec 10% de TC, ce qui a révélé clairement la bonne adhésion entre le TC et la matrice cimentaire.

Barkat et al. [230] ont rapporté une étude sur l'effet de l'addition de métakaolin MK et de calcaire locale comme substituant au ciment dans un BAP et ont vu leurs effets sur ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Les résultats des tests ont indiqué que le MK produit une activité pouzzolanique suffisante et contribue à améliorer les performances du béton en particulier à des stades ultérieurs. L'ajout de MK aux mélanges des BAP présente un dégagement de chaleur plus faible, une limite d'élasticité inférieure, une viscosité plastique plus élevée et un temps d'écoulement en entonnoir en V plus élevé. L'ajout de MK aux mélanges des BAP améliore les propriétés rhéologiques (fluidité, capacité de passage et résistance à la ségrégation). Pour les performances mécaniques et durabilité, la substitution du ciment avec 25% MK augmente la résistance à la compression, diminue la porosité à l'eau à 28 jours et diminue également l'absorption de l'eau par capillarité.

Benyamina et al. [231] ont testé l'influence des fines de calcaire de carrière du sable concassé sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du BAP. Le sable concassé a été remplacé par 0, 5, 10, 15 et 20% de fines de calcaire. Les résultats montrent que tous les mélanges des BAP étudiés ont un remplissage, une capacité de passage adéquat et ne présente aucune ségrégation. De plus, l'inclusion des fines de calcaire comme substituant de sable concassé réduit l'absorption d'eau capillaire, la migration des ions chlorure et améliore par conséquent les performances de durabilité.

Laidani et al. [232] ont remplacé le ciment avec deux types de bentonite calcinée (BC) dans le mortier autoplaçant (MAP). Les deux bentonites algériennes utilisée sont bentonite de Maghnia et bentonite de Mostaganem. Le ciment dans les MAP a été remplacé avec BC à 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30% en masse de ciment. Les résultats indiquent que le BC a diminué la fluidité de MAP.

À l'état durci, l'introduction de 10 à 15% de la bentonite donne une résistance à la compression plus élevée jusqu'à 90 jours (c'est le cas pour les deux bentonites). L'absorption d'eau a augmenté légèrement avec l'augmentation de BC, alors que la densité a diminué.

Zemir et al. [233] ont étudié la possibilité de renforcer un béton vibré par un BAP renforcé de fibres d'acier. Les résultats montrent que les BAP fibrés semblent convenir aux applications de renforcement et ils pouvaient s'écouler horizontalement sous leur propre poids sur toute la longueur de poutre, et remplissent le coffrage de renforcement sans vibration, améliore les caractéristiques mécaniques et donne une bonne rigidité de béton endommagé.

Ouldkhaoua [234] a étudié l'effet combiné de métakaolin (MK) comme ajout cimentaire, et les déchets de verre comme granulats fins (granulats du verre) (GV) pour développer un BAP écologique. Pour cette étude, le ciment a été remplacé par MK à des pourcentages de 5,10 et 15%, et le sable par 10, 20, 30, 40 et 50% de GV en poids du sable. Les résultats expérimentaux montrent que l'introduction de GV jusqu'à 50% dans les BAP avec MK améliore les propriétés rhéologiques, cette amélioration a un effet bénéfique pour atténuer l'effet négatif de MK sur l'écoulement des BAP. À l'état durci, l'ajout de 10% de MK améliore les propriétés mécaniques de BAP quel que soit le pourcentage de GV utilisé. L'ajout de MK a amélioré les aspects de durabilité étudiés et a minimisé l'effet négatif de GV surtout sur la réaction alcalis silice (RAS) des BAP.

Hammat.[235] a rapporté une étude sur l'effet de la teneur de substitution ainsi que l'effet de la surface spécifique de la pouzzolane naturelle et du laitier de hauts fourneaux sur la rhéologie, la résistance à la compression , le retrait total et endogène et l'absorption d'eau par capillarité du mortier autoplaçant (MAP). Le ciment a été partiellement substitué par 15% et 30% de la pouzzolane naturelle (PN) et de laitier (L), séparément. Les additions minérales sont broyées à trois finesses différentes, 350 m^2/Kg, 420 m^2/Kg et 500 m^2/Kg. Les résultats ont indiqué que la substitution du ciment par du laitier a un effet positif sur l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques des MAP, tandis que l'augmentation du niveau de remplacement de la pouzzolane naturelle affecte négativement les propriétés rhéologiques du MAP, la même tendance a été observée avec l'augmentation de la finesse. Une amélioration des résistances en compression est observée à long terme avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier ou de la pouzzolane. L'augmentation de la surface spécifique des additions minérales a un effet bénéfique sur le développement des résistances à long terme. L'incorporation du laitier dans les compositions de MAP génère une diminution du retrait total et une augmentation du retrait endogène pour des finesses de 420 m2/kg et 500 m2/kg. Cependant, pour une finesse de pouzzolane naturelle de 500 m2/kg, une augmentation du retrait total par rapport au mortier témoin est observée. L'absorption capillaire d'eau des MAP diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier et augmente avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre on a mis en évidence les différentes méthodes utilisées pour la formulation des BAP ainsi que les propriétés relatives à sa maniabilité et ses propriétés rhéologiques. La formulation de BAP est relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis pour assurer la capacité au remplissage et au passage, la résistance à la ségrégation et la stabilité qui sont les caractéristiques qui définissent l'autoplaçant de ces bétons. Sa formulation doit comporter une quantité importante de pâte et un pourcentage de superplastifiant pour satisfaire ces exigences.

Les BAP contiennent aussi une teneur importante en additions minérales, La nature, la teneur et la finesse de ces additions minérales utilisés dans leurs compositions peut influencer considérablement leurs caractéristiques à l'état frais en améliorant leur ouvrabilité et leurs caractéristiques rhéologiques et par conséquent faciliter la mise en œuvre tout en conservant leur stabilité. A l'état durci, elles peuvent améliorer la distribution des tailles de pores ce qui conduit à une densification de la microstructure et favorise l'amélioration des résistances à court et à long terme. L'incorporation des matériaux pouzzolanique comme la poudre de verre ou de la brique dans les BAP ou MAP peuvent améliorer leur structure interne, elle présente une distribution porosimétrique plus dense, qui conduit à une diminution de la taille des pores et par conséquent la diminution de la perméabilité au gaz, la diffusion des ions chlore, et l'absorption capillaire.

CHAPITRE III

MATÉRIAUX ET ESSAIS

Chapitre III

MATÉRIAUX ET ESSAIS

III.1. Introduction

Ce projet de thèse porte sur l'étude de l'optimisation de la finesse et du taux d'incorporation de la poudre de verre et de la poudre de brique et son effet sur les propriétés de mortier autoplaçant MAP.
Les poudres utilisées ont trois finesses différentes, une finesse comparable à la finesse du ciment, une autre légèrement supérieure à celle du ciment et une finesse presque le double de celle de ciment.
Il s'agit dans cette partie de la thèse de caractériser les matériaux de base et plus en détail les poudres pour évaluer ensuite leurs effets et performances sur les mortiers autoplaçants.

III.2. Présentation du plan expérimental

Afin de comprendre l'influence de l'incorporation de la poudre de verre et de la poudre de brique comme substituant au ciment dans les MAP, il est nécessaire d'étudier leur comportement à l'état frais et durci.

À cet effet, les MAP incorporant du verre et de brique finement broyé en remplacement partiel du ciment sont étudiés et comparés avec des MAP témoin à 100% ciment.

Pour ce qui est des matrices binaires (Ciment-PV) et (Ciment-PB), on a examiné l'ouvrabilité (Mini-Cône, V-funnel), les performances mécaniques (résistance à la compression, à la traction par flexion) et la durabilité (Absorption, porosité et retrait) des MAP sous l'angle de deux paramètres d'influence :
- La finesse de la PV et PB.
- Le taux d'incorporation de la PV et PB.

Concernant le premier paramètre d'influence, trois finesses différentes ont été utilisés (F1=3300 cm^2 /g, F2=4400 cm^2/g, F3=6000 cm^2/g) pour les deux poudres de verre et de brique. Pour le deuxième paramètre, deux séries de MAP ont été préparés. Dans la série I, le ciment a été remplacé en poids par 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de PV. Dans la série II le ciment a été remplacé par 4%, 8%, 12%,16% et 20% de la PB.

Concernant la composition ternaire, des MAP contenant la poudre de verre et de brique ont été préparés (Ciment-PV-PB). L'optimum de chaque série et la finesse utilisée pour le MAP ternaire est celui qui a donné les meilleures performances à l'état frais et durci dans les matrices binaires.

Les MAP ternaires contenant la PV et la PB en proportion de 12% et 8% respectivement avec une finesse F2=4400 cm^2 /g sont étudiés en regardant leurs performances à l'état frais et durci. Le but était d'examiner l'effet combiné de PV et PB comme ajouts cimentaires sur les propriétés mécaniques et la durabilité des MAP.

III.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.3.1. Ciment

Le ciment utilisé est de type CEM I 42,5 R sans aucune addition (95 % clinker avec 5 % de gypse), produit par le groupe industriel des ciments SPA Biskria (Algérie) et conforme à la norme NF EN 197-1[236]. Sa surface spécifique est de 3300 cm2/g, sa densité est de 3,12. Les compositions minéralogiques, ainsi que les propriétés chimiques et physiques du ciment sont présentées dans le tableau III.1.

III.3.2. Déchets de verre

Les déchets de verre (verre à vitre) sont nettoyés et mis dans une étuve à 105 C° pour les sécher afin d'éliminer l'humidité avant de les broyer (Figure III.1). La poudre de verre est obtenue par concassage et broyage de ces déchets.



(a) (b)

Figure III.1 : Déchets de verre (a) avant broyage, (b) après broyage.

Le broyage est effectué en deux étapes, pour la 1^{ére} étape on a utilisé un broyeur à boulets de capacité de 20 kg du laboratoire de génie civil de l'université de Blida, puis tamisé à travers des ouvertures de tamis de 80 µm.
Dans la 2^{éme} étape, un broyeur à disque a été utilisé au niveau du Hall de technologie de l'université de Médéa pour avoir les finesses désirées.
Les finesses des poudres ont été déterminées à l'aide de l'appareil de perméabilité à l'air Blaine.
La figure III.2 résume la procédure de recyclage, concassage et broyage des déchets de verre (la même procédure a été suivi pour les déchets de brique calcinée).



Figure III.2 : Processus de recyclage, concassage et broyage de déchets de briques et du verre.

III.3.3. Déchets de brique

Les déchets de brique ont été récupérés d'une briqueterie à Blida puis nettoyés, séchés, concassés et broyés (Figure III.3). La même procédure de broyage a été suivie pour les déchets de briques.



(a) (b)

Figure III.3 : Déchets de brique : (a) avant broyage,(b) après broyage.

Les compositions minéralogiques du ciment, du verre à vitre et de la brique calcinée ont été déterminées par la diffraction des rayons X (DRX) et les résultats sont montrés dans la figure III.4. Les essais DRX, EDX et MEB ont été effectués au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) Laghouat.
Le quartz est la phase cristalline majeure des deux déchets de verre et de brique, d'autres compositions comme, calcite, dolomite sont aussi détectés pour la brique. Du Calcium, Sodium et Fer sous forme d'oxydes, sont également présents dans la poudre de verre mais avec des quantités modérées, résultats également confirmés par des tests d'énergie dispersifs des rayons X (EDX) présentés sur la figure III.5. Les propriétés chimiques et physiques du PV et PB sont également présentées dans le tableau III.1

Tableau III.1. Compositions chimiques et propriétés physiques de Ciment, PV et PB.

Elément (%)	**Ciment**	**PV**	**PB**
Propriétés chimiques			
SiO_2	20,83	72,68	57,43
Al_2O_3	4,13	1,11	15,45
Fe_2O_3	5,58	0,74	5,80
CaO	62,19	9,47	11,26
MgO	1,42	1,74	2,09
K_2O	2,30	0,46	2,46
Na_2O	0,38	12,52	1,44
TiO_2	0,028	0,07	0,68
SO_3	-	0,25	0,32
P_2O_5	-	0,01	0,20
Propriétés physiques			
Densité	3,12	2,5	2,6
Finesse de Blaine (cm^2/g)	3300	3300 4400 6000	3300 4400 6000

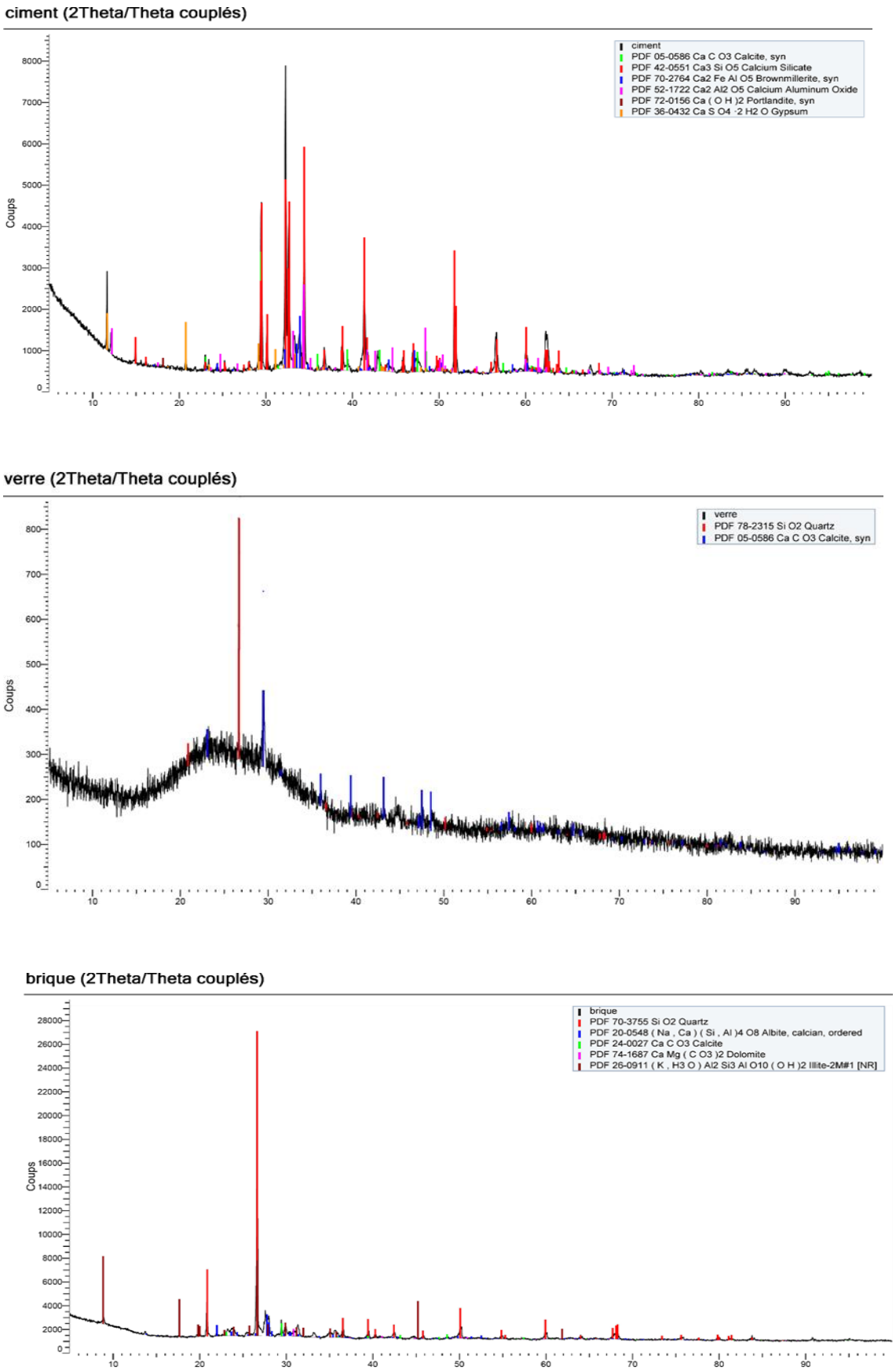


Figure III.4: Analyse minéralogique par DRX ,Ciment, PV, PB.

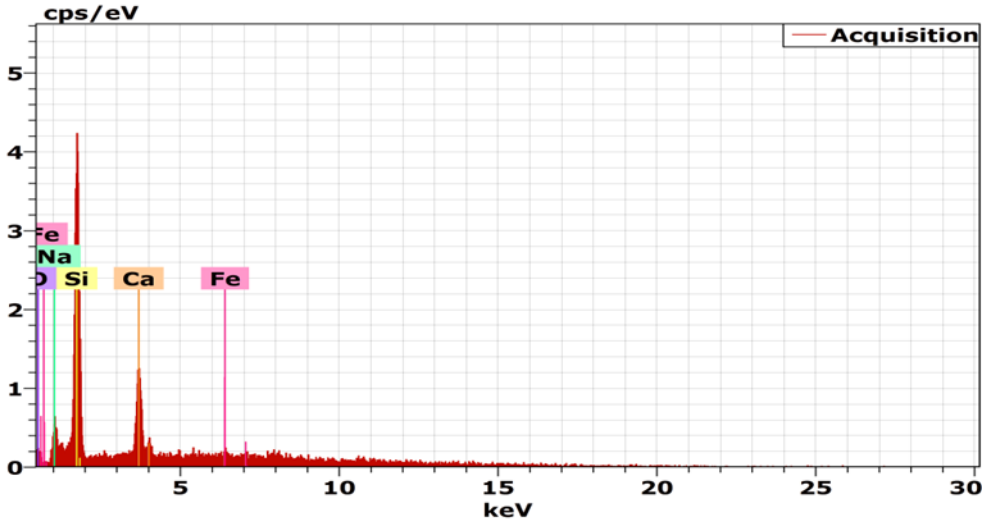
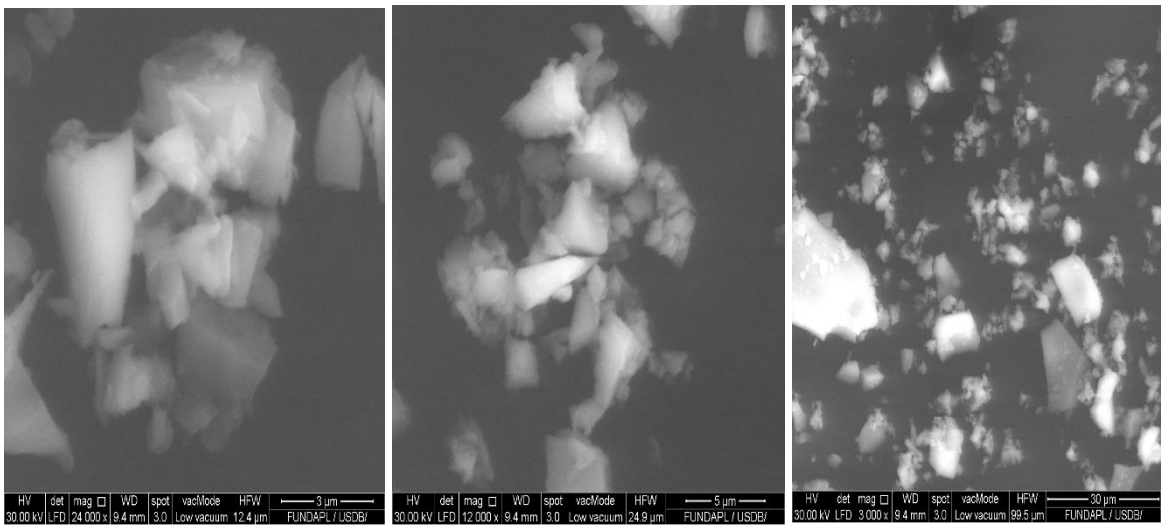
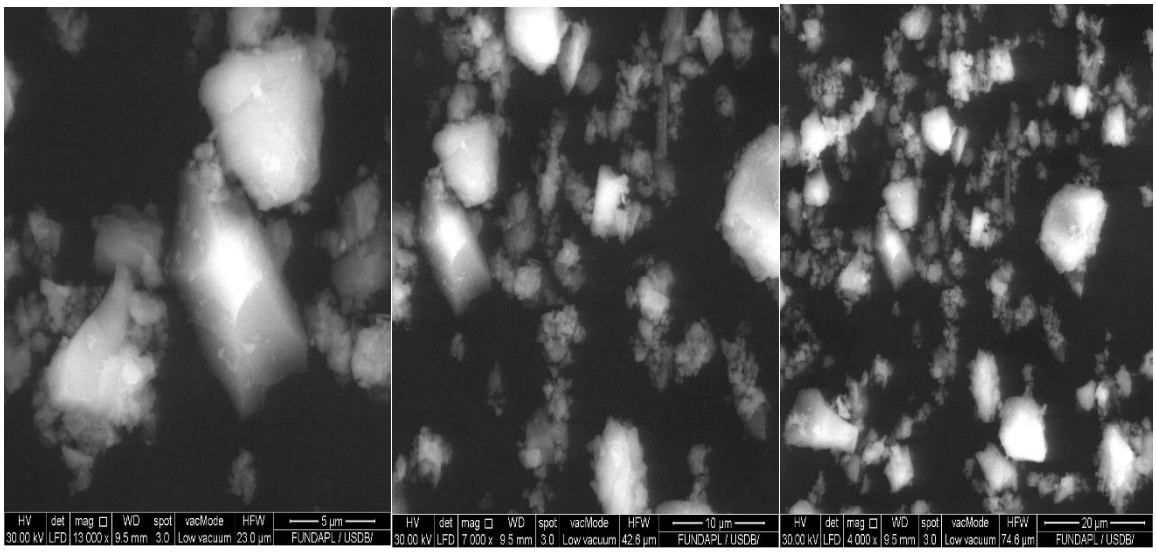


Figure III.5: EDX verre.

La figure III.6 montre la morphologie des poudres de verre et de brique déterminé par microscope électronique à balayage (MEB), effectué au niveau du CRAPC Laghouat. Comme on peut voir, les deux poudres de brique et du verre ont presque la même morphologie, les particules ont une forme angulaire et irrégulière.



(a)



(b)

Figure III. 6: Images MEB (a) poudre de verre, (b) poudre de brique.

III.3.4. Sable

Le sable utilisé est un sable de dune qui provient de la région d'Oued-Souf. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie (Figure III.7). Les caractéristiques physiques de ce sable sont données dans le tableau III.2 et sa courbe granulométrique est présentée dans la figure III.8.

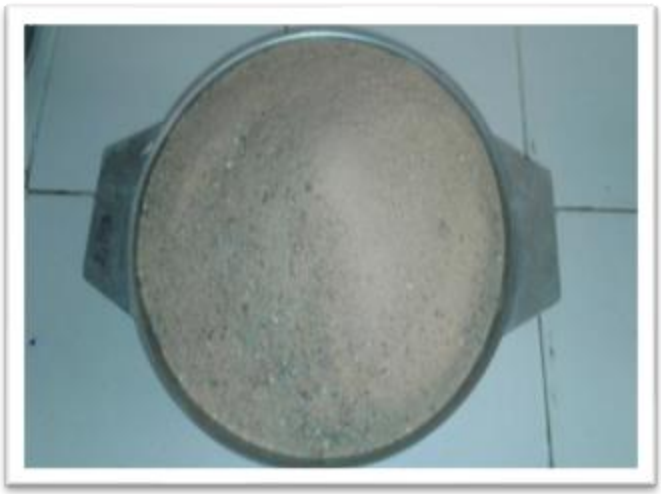


Figure III.7: Sable d'Oued-Souf utilisé.

Tableau III.2. Propriétés physiques d'identification du sable.

Caractéristiques	**Sable**
Provenance	Oued-souf
Classe granulaire	0/5
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.58
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,63
Taux d'absorption d'eau (%)	0,7
Module de finesse	2,5
Équivalent de sable (%)	83,33

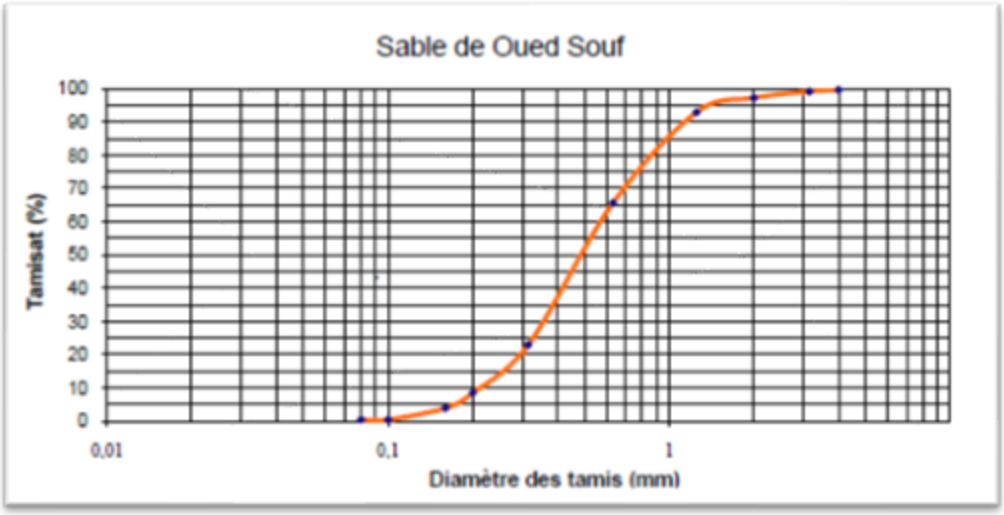


Figure III.8: Courbe granulométrique du sable utilisé.

III.3.5. Eau de gâchage

La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence négative sur les performances des mortiers et des bétons. Elle doit être propre ne présentant pas un excès d'impuretés (matières organiques, élément chimiques). L'eau utilisée pour le gâchage des mortiers autoplaçants est de l'eau potable du robinet exempte d'impuretés.

III.3.6. Superplastifiant

Afin d'assurer une ouvrabilité satisfaisante avec réduction d'eau de gâchage, on a employé un adjuvant Super plastifiant – Haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom « MEDAFLOW 145 », sous forme de liquide d'une couleur brun clair, de PH de 5-6 et de densité de 1,065. L'extrait sec de cet adjuvant représente 30% de sa masse. Sa plage normale d'utilisation de 0,3 à 2 % du poids de ciment, est fixée par la fiche technique [237].

III.4. Formulation

III.4.1. Formulation du Mortier (MAP)

La phase de formulation du mortier autoplaçant (MAP) est une phase très importante, car elle fournit indication de la lubrification entre les particules des gros granulats, la viscosité et la mobilité du béton ainsi que sa stabilité globale.

Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant sont : une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En terme de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange.

En l'absence d'un rhéomètre pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, la fluidité du mortier a été évaluée par l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs [238].

De multiples approches se sont développées á travers le monde pour la formulation des bétons ou mortiers autoplaçant. La plupart des méthodes de formulation sont conçues actuellement de manière empirique. Notre contribution est d'appréhender le rôle des poudres de verre et de la brique calcinée comme ajouts cimentaires sur les propriétés du mortier frais ainsi que sur les performances des MAP à l'état durci. La teneur des poudres de verre et de la brique calcinée est fixée au préalable pour toutes les compositions étudiées. Les proportions des autres matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant ont été déterminées en utilisant la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par Okamura et Ouchi [154] avec quelques modifications apportées au niveau de la détermination de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/ciment (E/C) ainsi que le rapport super plastifiant/ciment (SP/C) et ceci dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du mortier à l'état frais.

L'optimisation du pourcentage de SP consiste à développer les caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer les propriétés souhaitées. Dans cette étude on a fixé le rapport sable/mortier S/M=0.5, et le rapport E/C= 0,40 et on a varié le pourcentage du SP de 0,6% à 0.9 % avec un pas de 0.1%, la sélection du mélange est ajustée par l'essai d'étalement au Mini-Cône, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre 270 mm $\leq$ D $\leq$ 330 mm, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 s et 10 s [238].

III.5. Procédure de malaxage

Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [238]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ 1 minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de capacité de 5 litres) ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant ;
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

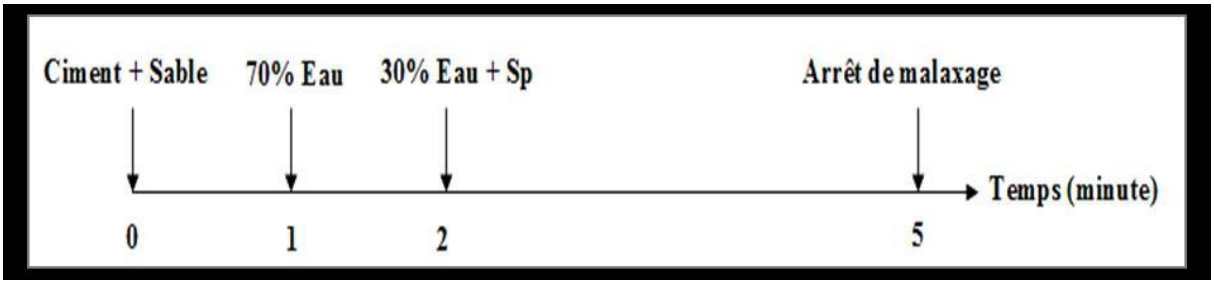


Figure III.9: Séquence de malaxage du mortier autoplaçant.

III.6. Conditionnement et conservations des éprouvettes

Les mélanges ont été coulés dans des moules prismatiques de 4x4x16cm^3 et laissés dans les moules 24h (Figure III.10). Passé les 24h, la moitié des éprouvettes ont été mise dans l'eau à température ambiante de 20°C± 2°C, et l'autre moitié laissée à l'air libre pour des cures de 7, 14, 28, 56, 90 et 400 jours.

Après la période de durcissement, les échantillons deviennent prêts à être utilisés pour les essais.

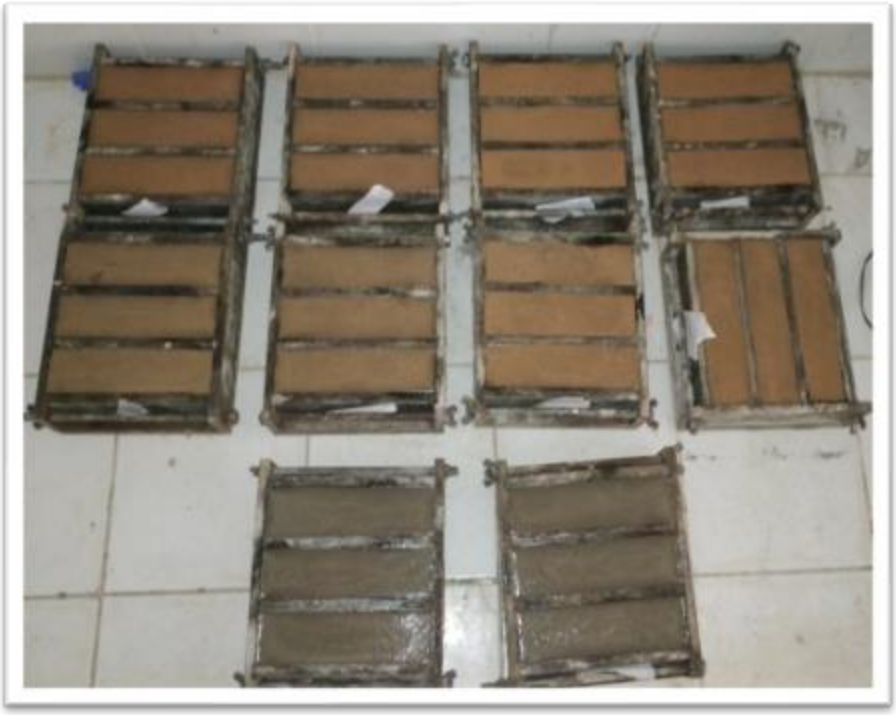


Figure III.10 : Eprouvettes prismatiques confectionnées.

III.7. Essais sur MAP à l'état frais

III.7.1. Essais au Mini-Cône

La caractérisation des mortiers autoplaçants (MAP) est effectuée par l'essai de l'étalement au mini-cône. Le principe de l'essai consiste à placer le cône au centre d'une plaque horizontale légèrement humidifiée, une fois rempli, le cône est soulevé verticalement laissant ainsi la pâte s'étaler sous l'effet de son propre poids afin de former une galette plus ou moins, circulaire. L'étalement est estimé par la moyenne (D_{moy}) de deux mesures de diamètres orthogonaux D_1et D_2 de la galette de MAP.

III.7.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

L'essai de l'écoulement de mortier a été réalisé à l'aide de mini-entonnoir en V, proposé par [Okamura et al.] dans leur méthode Japonaise de formulation de BAP. Le principe de l'essai consiste à remplir un mini-entonnoir en V par environ 1,1 litre de MAP tout en maintenant le clapet fermé. Le clapet est ensuite ouvert permettant au MAP de s'écouler au travers l'orifice. Le temps d'écoulement Tv est le temps nécessaire pour vider complètement le mini-entonnoir de mortier à travers de son orifice.

III.8. Essais sur MAP à l'état durci

III.8.1. Résistance à la compression

La résistance mécanique est une propriété qui caractérise généralement la qualité des mortiers. L'importance de cette grandeur en termes de qualité du béton ou mortier est reliée directement à la composition de la pâte de ciment. L'essai de la résistance à la compression s'effectue, conformément à la norme EN 12390-3 [239], par écrasement des demi– prismes de trois éprouvettes prismatiques obtenus après rupture en flexion. L'essai a été réalisé à l'âge de 7, 14, 28, 56, 90 et 400 jours. Les résultats sont obtenus par la moyenne de trois éprouvettes testées.

III.8.2. Résistance à la traction par flexion

L'essai de la résistance à la traction par flexion trois points est réalisé, conformément à la norme NF EN 12390-5 [240]. L'essai consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (4×4×16) cm^3 à 3, 7, 14, 28, 56, 90 et 400 jours. Les résultats obtenus sont la moyenne des valeurs de trois éprouvettes.

III.8.3. Absorption d'eau par immersion totale

La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à 105±5°C pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit M0 la masse initiale [241].

Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant 24 heures. Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, elles sont pesées de nouveau, soit M1 la nouvelle masse [244,245].

Le taux d'absorption est calculé comme suit (Eq III.1) :

$$Ab\ (\%) = \frac{M1-M0}{M0} \times 100 \qquad \text{Eq : III.1}$$

Avec :

Ab : taux d'absorption en % ;

M0 : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg ;

M1 : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;

III.8.4. Porosité accessible à l'eau

L'essai permet d'évaluer la porosité ouverte, correspondant au rapport du volume total des pores ouverts accessibles à l'eau dans un corps poreux à son volume apparent.

L'essai consiste à sécher l'échantillon dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à poids constant : c'est la masse sec (Msec), l'échantillon est passé ensuite à imbibition sous vide, et après saturation, on fait une pesée sous eau (Meau) et une autre dans l'air (Mair) (Figure II.11) [244].

Le calcul de porosité est exprimé par l'équation suivante (Eq III.2):

$$\text{Porosité (\%)} = \frac{Mair - Msec}{Mair - Meau} \times 100 \qquad \text{Eq :III.2}$$

Avec :

Mair, Msec et Meau : sont les masses d'éprouvette imbibée pesée dans l'air, sèche et dans l'eau respectivement.

Assurez que l'éprouvette est propre et sèche avant de la peser. Prenez note de sa masse à sec avec une balance précise (Msec). Prenez un récipient assez grand pour que l'éprouvette puisse être complétement immergé dans l'eau. Suspendez l'éprouvette avec un fil fin ou un dispositif qui permet de la plonger dans l'eau sans qu'elle touche les parois du récipient. Assurez qu'elle est totalement immergé dans l'eau , notez la nouvelle masse indiquée par la balance (Meau).



Figure III.11 : Essai de porosité.

III.8.5. Retrait

L'essai de retrait présente les propriétés intrinsèques du matériau indépendamment de tout chargement mécanique extérieur appliqué. L'essai de retrait a été effectué conformément au mode opératoire précisé par la norme NF P15-433 [245]. La mesure des variations volumiques a été effectuée sur des éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions (4x4x16) cm^3. Au moment du coulage, des ancrages (plots en inox) sont placés aux deux extrémités de l'échantillon et fixés sur le moule qui servira à le positionner sur l'appareil de mesure. Les parois internes sont enduites d'huile, afin de faciliter le démoulage.

La mesure du retrait a été réalisée par un comparateur numérique de précision de 1µm. Les éprouvettes destinées pour la mesure du retrait total ont été conservées dans une pièce dont la température est maintenue à 20 C°±1 et l'humidité relative à 55% ±5. Les essais de retrait ont été réalisés pendant 1, 2, 3, 7, 14, 28 et 56 jours pour tous les mélanges.

III.8.6. Réaction alcalis-silice

Les mesures de la réaction alcali-silice (RAS) accélérée ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (2.5x2.5x28 cm^3) conformément à la norme ASTM C 1260 [246]. Les échantillons sont ensuite placés dans l'eau distillée à 80°C pendant 24 ± 2 heures. Les barres étaient transférées dans des récipients remplis avec une solution de NaOH 1M à 80°C. Les variations de longueur des barres ont été mesurées à 1, 4, 7, 14 et 28 jours (Figure III.12).

La longueur initiale (L0) des échantillons a été mesuré à l'aide d'un réfractomètre muni d'un comparateur et considéré comme point de référence des échantillons intégrés après 24h dans l'eau distillée et avant qu'ils ne soient immergés dans une solution de NaOH pour le durcissement. Et la longueur (Lt) a été mesurée à intervalles réguliers pendant 3, 7, 14 et 28 jours, respectivement.

Ensuite, l'expansion RAS des barres de mortier est calculée à l'aide de l'équation (Eq III.6).

$$Exp\ (\%) = [(Lt-L0)/L0)]\times 100\ \% \qquad \text{Eq :III.6}$$



Figure III.12 : Essai de réaction alcali-silice (RAS).

III.8.7. Résistance à haute température

Pour évaluer la résistance au feu, six échantillons prismatiques (demi- prismes obtenus après le test de flexion de trois spécimens de 4×4×16 cm^3) ont été sélectionnés, après 90 jours de durcissement dans l'eau et à l'air libre.

Les échantillons ont été séchés dans un four à 105°C pendant 24 h pour éliminer toute apparence d'humidité, ensuite elles sont chauffées dans un four à moufle à différentes températures 400°C, 600°C et 800°C (Figure III.13). La vitesse de chauffe est 5°C/min [247].

Une fois que le four atteint la température ciblée, la température a été maintenu constante pendant 2 heures. Les échantillons ont été refroidis naturellement à l'air libre.

Pour chaque température, des mesures de pertes de masse ont été évaluées par la relation (Eq III.7) :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \qquad \text{Eq :III.7}$$

Avec :

M1, M2 : les masses des éprouvettes avant et après le chauffage respectivement.

Les résultats des tests de compression et de résistance à la compression résiduelle des mortiers ont permis de calculer l'indice de résistance résiduelle (RCR) à l'aide de l'équation (Eq III.8) :

$$\text{RCR (\%)} = \frac{RC2}{RC1} \times 100 \qquad \text{Eq :III.8}$$

Avec :

RCR (%) : résistance à la compression résiduelle,

RC1 (MPa) : la résistance à la compression initiale du mortier après 90 jours de cure (20°C).

RC2 (MPa) :la résistance à la compression résiduelle du mortier après chauffage 400°C,600°C,800°C.



Figure III.13 : Essai de Résistance à haute température.

III.8.8. Observation par microscope électronique à balayage (MEB)

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été faites au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) laghouat sur des échantillons des compositions optimales de chaque série, en utilisant l'équipement FEI-QUANTA 650 avec 30 KV comme voltage accélérant.

III.9. Conclusion

Afin de mettre en évidence les effets physico-chimiques et mécaniques des déchets de verre et de la brique calcinée en tant que ajouts cimentaires sur les propriétés des MAP, une caractérisation complète des matériaux et une mise en place de procédures expérimentales s'est avérée nécessaire.

Ce deuxième chapitre a été consacré à cet effet, dans lequel :

- Nous avons exposé les différents matériaux utilisés pour la formulation des MAP ainsi que leurs propriétés physico-chimiques.
- La méthode de formulation, et des séquences de malaxage des différents mélanges de MAP utilisés.
- Les essais de caracterisation à l'état frais à travers l'essai d'étalement (Mini-cône) et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) sur des MAP avec différents dosages en PV et PB.
- Les essais de caractérisation à l'etat durci telles que la résistance à la compression et à la flexion afin d'évaluer l'influence de PV et PB sur le mortier binaire (Ciment-PV) et (Ciment-PB) et ensuite sur le mortier ternaire (Ciment-PV-PB).
- Et à la fin, pour apprécier les propriétés de durabilité, plusieurs essais ont été définis dans le but d'évaluer les propriétés de transfert des différents mélanges à travers l'essai de porosité, d'absorption capillaire, absorption par immersion totale, réaction alcali-silice…. ect.

CHAPITRE IV

EFFET DES POUDRES DE VERRE ET DE BRIQUE SUR LE COMPORTEMENT DES MAP À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI

CHAPITRE IV

EFFET DES POUDRES DE VERRE ET DE BRIQUE SUR LE COMPORTEMENT DES MAP À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus à partir des différents essais effectués à l'état frais et durci sur les mortiers autoplaçants à base de poudres de verre et de la brique calcinée comme ajout cimentaire. Les résultats obtenus sont comparés avec d'autres recherches de la littérature. La première partie présente les résultats d'essais d'optimisation du rapport sable sur mortier (S/M) et du dosage en superplastifiant (Sp/L). La deuxième partie est réservée à l'étude de l'influence de chaque ajout cimentaire seul ainsi que l'effet de la finesse sur l'ouvrabilité des MAP.
Pour la troisième partie l'influence de la teneur et la finesse de chaque ajout cimentaire seul sur la résistance en compression, la résistance à la traction par flexion, la porosité, l'absorption par immersion totale, le retrait, la résistance au feu ainsi que sur la réaction alcali silice (RAS).

Dans la quatrième partie et après avoir déterminé l'optimum de chaque composite binaire (Ciment+PV) et (Ciment+PB) on a examiné l'effet combiné du ciment et PV + PB comme ajouts cimentaires sur les propriétés mécaniques et la durabilité des MAP.

IV.2. Optimisation des rapports S/M et SP/L

Pour la formulation du mortier autoplaçant de référence, on a utilisé la méthode générale dite aussi japonaise. L'optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement au mini-cône et la mesure de temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers. Les rapports SP/L et le S/M sont ajustés de telle manière à obtenir un mortier de grande fluidité avec un étalement entre 270 et 330 mm, une viscosité appropriée avec un temps d'écoulement entre 2 et 10 sec et de grande résistance à la ségrégation et sans effet de ressuage (évalué visuellement).

Le principe de la méthode consiste à chercher la composition optimale pour des rapports S/M de 0.45 et 0.5 tout en faisant varier le rapport SP/L de 0.7 % à 0.85% avec un rapport E/C de 0.38 et 0.4. Les résultats des essais d'étalement au mini-cône et le temps d'écoulement au mini-V funnel pour le choix de SP et du rapport S/M optimal sont illustrés dans le tableau IV.1.

D'après le tableau IV.1, on a constaté que le rapport E/C = 0,38 n'est pas efficace, malgré l'augmentation du dosage de superplastifiant le mortier est ferme, l'étalement reste faible et le temps de V-funnel est toujours long ; pour améliorer la fluidité et la viscosité il faut augmenter le rapport E/C à 0.4. Avec l'augmentation de la quantité d'eau, on constate que les mortiers présentent un aspect homogène. Pour les mortiers avec un rapport S/M de 0.45 et E/C = 0.4 des signes de ressuage ont été remarqué.

Pour un dosage de 0.85%, un rapport S/M de 0.5 et un E/C de 0.4, le mortier présente une bonne fluidité avec un étalement de 298 mm sans risque de ressuage ou de ségrégation. Cet essai préliminaire nous a permis de fixer le dosage du SP de 0.85% et un S/M =0.5.

Avec l'utilisation des matériaux locaux algériens, un rapport S/M égal à 0,5 est le rapport adéquat pour obtenir des mortiers très fluides, homogènes et de grande capacité de passage dans les zones les plus encombrées [17]. Boukendakdji [162] et Belaidi [212] ont testés des BAP à base de matériaux locaux. Ils ont montré qu'un rapport S/M égal à 0.5 est adéquat pour obtenir un bon BAP.

Aussi, de nombreuses études ont montré que 50% de volume de sable permettant d'obtenir un béton autoplaçant avec des bonnes propriétés rhéologiques [251,252,214,156]**.**

Tableau IV.1: Résultats des essais sur mortier autoplaçant pour différents % de Sp, E/C et S/M.

	Map1	**Map2**	**Map3**	**Map4**	**Map5**	**Map6**	**Map7**	**Map8**
Sp	0,7	0,75	0,8	0,85	0,7	0,75	0,8	0,85
S/M	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
E/C	0.38	0.38	0.38	0.38	0.4	0.4	0.4	0.4
Dmoy	240	250	260	265	260	279	325	330
Tmoy(s)	10	9.5	9.2	9	9.5	7.5	4.2	3.4
Observation	**Mélange ferme**	**Mélange Ferme**	**Mélange Ferme**	**Mélange Ferme**	**Mélange ferme**	**Mélange homogéne**	**Ressuage**	**Ségrégation**
	Map 9	**Map 10**	**Map 11**	**Map 12**	**Map 13**	**Map 14**	**Map 15**	**Map 16**
Sp	0,7	0,75	0,8	0,85	0,7	0,75	0,8	0,85
S/M	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
E/C	0.38	0.38	0.38	0.38	0.4	0.4	0.4	0.4
Dmoy	210	240	260	274	250	262	275	298
Tmoy(s)	12	10	9.7	9.3	11.7	9.6	8.56	5.62
Observation	**Mélange ferme**	**Mélange Ferme**	**Mélange Ferme**	**Mélange peu Ferme**	**Mélange ferme**	**Mélange peu ferme**	**Mélange homogéne**	**Mélange homogéne**

IV.3. Influence des PV et PB comme ajout cimentaire sur l'ouvrabilité des MAP

Il s'agit d'étudier l'effet du taux de substitution et la variation de la surface spécifique des PV et PB comme ajout cimentaire sur l'ouvrabilité des mortiers à travers des essais particuliers aux MAP. Le tableau IV.2 résume la composition des mortiers étudiés.

Tableau IV.2 : Composition des différentes MAP étudiés sur un 1 m3.

Mélange	**Ciment (Kg/m^3)**	**PV (Kg/m^3)**	**PB (Kg/m^3)**	**Sable (Kg/m^3)**	**SP (%)**
MAP-Témoin	694,26	-	0	1315	0,85
MAP-8PV	633,92	55,12	0	1315	0,8
MAP-12PV	603,9	82,35	0	1315	0,8
MAP-16PV	574,61	109,45	0	1315	0,8
MAP-20PV	545,22	136,31	0	1315	0,8
MAP-24PV	516,26	163,03	0	1315	0,8
MAP-4PB	664,11	0	27,67	1315	0,9
MAP-8PB	635,01	0	55,22	1315	0,9
MAP-12PB	605,47	0	82,56	1315	0,9
MAP-16PB	575,57	0	109,53	1315	0,9
MAP-20PB	546,62	0	136,66	1315	0,9
MAP-80 ciment+12PV+8PB	545,93	81,89	54,59	1315	0,85

MAP-Témoin : Mortier de référence (100% ciment).
MAP-8PV : Mortier autoplaçant avec de 8% PV.
MAP-12PV : Mortier autoplaçant avec de 12% PV.
MAP-16PV : Mortier autoplaçant avec de 16% PV.
MAP-20PV : Mortier autoplaçant avec de 20% PV.
MAP-24PV : Mortier autoplaçant avec de 24% PV.

MAP-4PB : Mortier autoplaçant avec de 4% PB.
MAP-8PB : Mortier autoplaçant avec de 8% PB.
MAP-12PB : Mortier autoplaçant avec de 12% PB.
MAP-16PB : Mortier autoplaçant avec de 16% PB.
MAP-20PB : Mortier autoplaçant avec de 20% PB.
MAP-(80ciment+12PV+8PB) : Mortier autoplaçant avec 80% ciment+12% de PV+8% de PB.

Pour toutes les compositions étudiées, les rapports S/M et E/L ont été fixé à 0,5 et 0,4 respectivement. En s'appuyant sur les résultats d'optimisation obtenus, nous avons opté pour un rapport SP/L variant de (0,8 à 0,9). Dans cette étude expérimentale, le ciment est partiellement substitué par la poudre de verre PV et de la poudre de brique PB à des teneurs de 0%, 8%,12%,16% ,20% et 24%, et 0%,4%,8%,12%,16% et 20% respectivement.

Les résultats expérimentaux d'ouvrabilité pour les différentes compositions de mortiers autoplaçants sont résumés dans les tableaux IV.3 et IV.4.

IV.3.1. Influence de la teneur et la finesse du PV sur l'ouvrabilité des MAP

Le ciment est substitué par la poudre de verre PV à des teneurs de 8%,12%,16%,20% et 24%. L'effet de trois finesses différentes a été étudié. Dans cette étape, le mortier doit présenter un aspect homogène. Les résultats des essais à l'état frais sont présentés dans le tableau IV.3 et illustrés sur les figures IV.1 et IV.2.

Tableau IV.3: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de PV.

Teneur (%)	**Finesse du PV, SSB (cm^2/g)**					
	3300		**4400**		**6000**	
	Etalement (mm)	Temps (s) V-funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-funnel
0	298	5,62	298	5,62	298	5,62
8	300	4,94	298	5,25	295	5,5
12	302	4,8	300	5,09	292	5,8
16	305	4,57	302	4,79	290	6,03
20	307	4,42	304	4,55	288	6,14
24	309	4,2	304	4,35	287	6,47

IV.3.1.1. Essai d'étalement au mini-cône

La figure IV.1 présente les valeurs d'étalement des mélanges (MAP-PV) avec trois finesses différentes (F1, F2, F3).
D'après les valeurs d'étalement qui sont dans l'intervale [270-330] mm, comme recommandé par domone et jin [238] qui confirment qu'avec ces valeurs le MAP présente la capacité d'écoulement sans ségrégation et saignement.

Il est également observé une amélioration de l'étalement des mortiers avec l'accroissement de la teneur en PV. Pour les trois finesses l'ouvrabilité est supérieure à celle de mortier témoin.
A titre d'exemple, pour les MAP-PVF1(3300 cm^2/g), une augmentation des valeurs d'étalement du mortier de 1,34%, 2,35%, 3,02 et 3,69 a été observée pour les mortiers confectionnés avec 12%, 16%, 20% et 24% respectivement comparé avec celui du mortier témoin à 0% PV. D'autre part, en comparant les trois finesses, on remarque que l'étalement de MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) est plus élevé que celui de MAP-PVF2 et celui du MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et plus élevé que celui du MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) et ceci pour chaque taux de substitution. Cela indique que le gain d'ouvrabilité observé avec les poudres de verre est inversement proportionnel à leur finesse.
L'amélioration de l'ouvrabilité des mélanges augmente relativement avec l'augmentation du taux de remplacement de la poudre de verre, et le 24 PV a montré l'étalement le plus élevé.

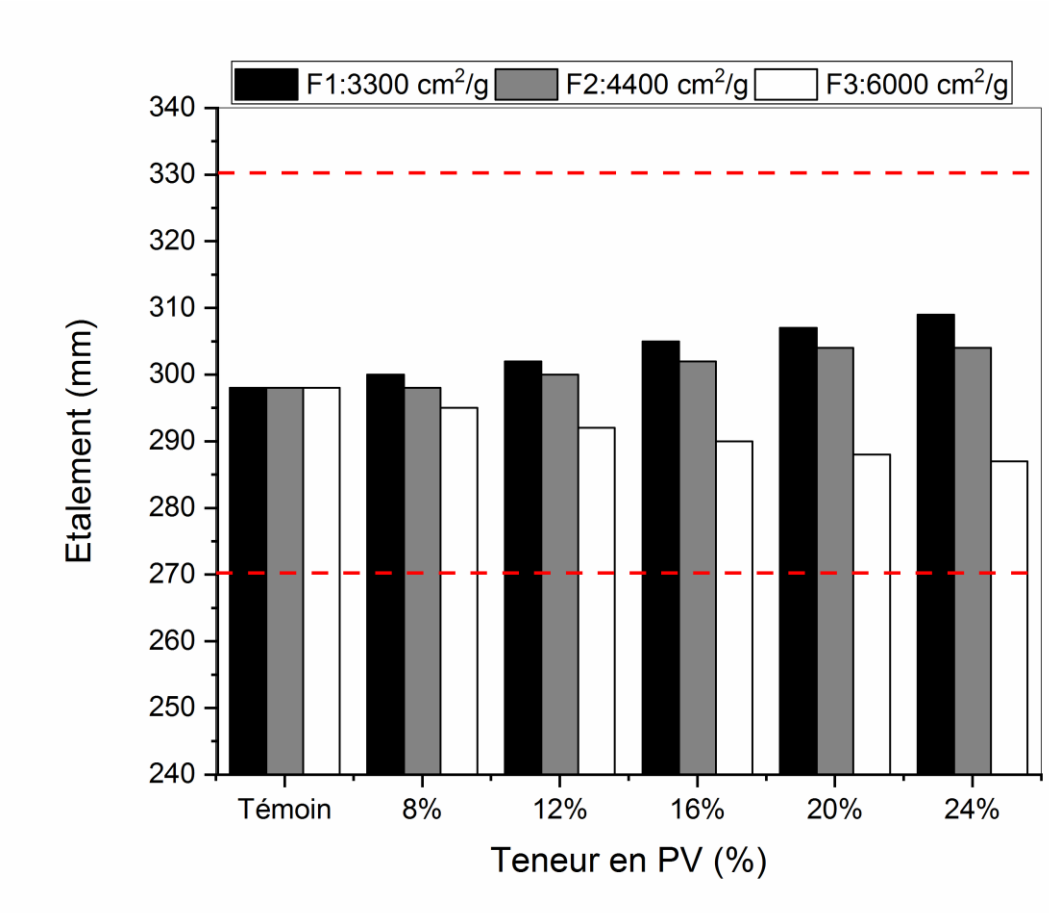


Figure IV.1: Variation de l'étalement des MAP à base de PV avec différentes finesses.

D'après ces résultats, on peut conclure que l'utilisation du PV dans le mortier permet d'obtenir une meilleure ouvrabilité comparée à celle d'un mortier témoin. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Ibrahim et al.[250], où il a été confirmé qu'une amélioration des valeurs d'affaissement est observée avec l'augmentation du pourcentage de PV dans les compositions de béton ordinaire. Cette amélioration de l'ouvrabilité en présence de la poudre de verre pourrait être exprimée par l'absorption faible de l'eau par la poudre de verre et par sa surface lisse.

De plus, d'autres chercheurs Yi Jian et al. [251] ont rapporté que les propriétés physiques et géométriques des particules de PV, à l'exemple de l'absorption d'eau, la morphologie et la taille des particules peuvent affecter de manière significative l'ouvrabilité du mortier et du béton. Nassar et al.[76] ont également étudié l'effet du PV sur les propriétés de béton. Leurs résultats ont montré que les valeurs d'affaissement s'améliorant pour une teneur de substitution en PV de 20% et une finesse de 4925 cm^2/g. Ces résultats sont en accord à ceux trouvés par Hossam et al.[252], où il a été confirmé qu'une amélioration des valeurs d'étalement est observée avec l'augmentation du pourcentage de PV dans les compositions de béton.
Par ailleurs, Metwally et al. [37] ont étudié l'effet du PV sur les propriétés des bétons à l'état frais et ont constaté que l'augmentation de la surface spécifique de l'addition entraîne une diminution des valeurs d'affaissement. Ce comportement a été expliqué par une forte consommation d'eau par les grains de PV de grande surface spécifique 6500 cm^2/g.

Une autre recherche a été conduite afin d'étudier les propriétés rhéologiques des BAP avec de la poudre de verre d'une finesse de 3740 cm^2/g. les résultats montrent des valeurs d'étalement comparables à ceux du BAP témoin [54].

IV.3.1.2. Essai d'écoulement au V-Funnel

L'effet du taux de substitution ainsi que l'influence de la finesse du PV sur la variation du temps d'écoulement à l'entonnoir en V des MAP étudiés sont illustrés sur la figure IV.2. Tous les mélanges de MAP ont donné des valeurs de temps d'écoulement dans la plage recommandés de 2 à 10 s [238].

Par ailleurs, les résultats indiquent clairement que l'incorporation du PV dans les mélanges de mortier provoque une diminution du temps d'écoulement. Le temps d'écoulement diminuait avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre ce qui mène à une diminution de la viscosité. Les mélanges avec PVF1 (3300 cm^2/g) montrent de meilleures performances que ceux avec PVF2 (4400 cm^2/g) et PVF3 (6000 cm^2/g), mais le maintien de la maniabilité est assuré pour les trois finesses.
Une diminution du temps d'écoulement de 5,62 s à 4,2 s a été enregistrée pour une teneur de 24% de PV et une finesse de 3300 cm^2/g. En revanche, nous avons remarqué que l'augmentation de la teneur en PV avec une finesse de 6000 cm^2/g engendre une augmentation du temps d'écoulement.Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux exposés par Mahdi et al.[253]. En effet, les auteurs ont conclu que l'augmentation de la teneur de substitution du ciment par la poudre de verre réduit le temps d'écoulement améliorant ainsi la capacité de remplissage. Ceci a été expliqué par les surfaces lisses des particules de verre et l'absorption d'eau presque nulles.

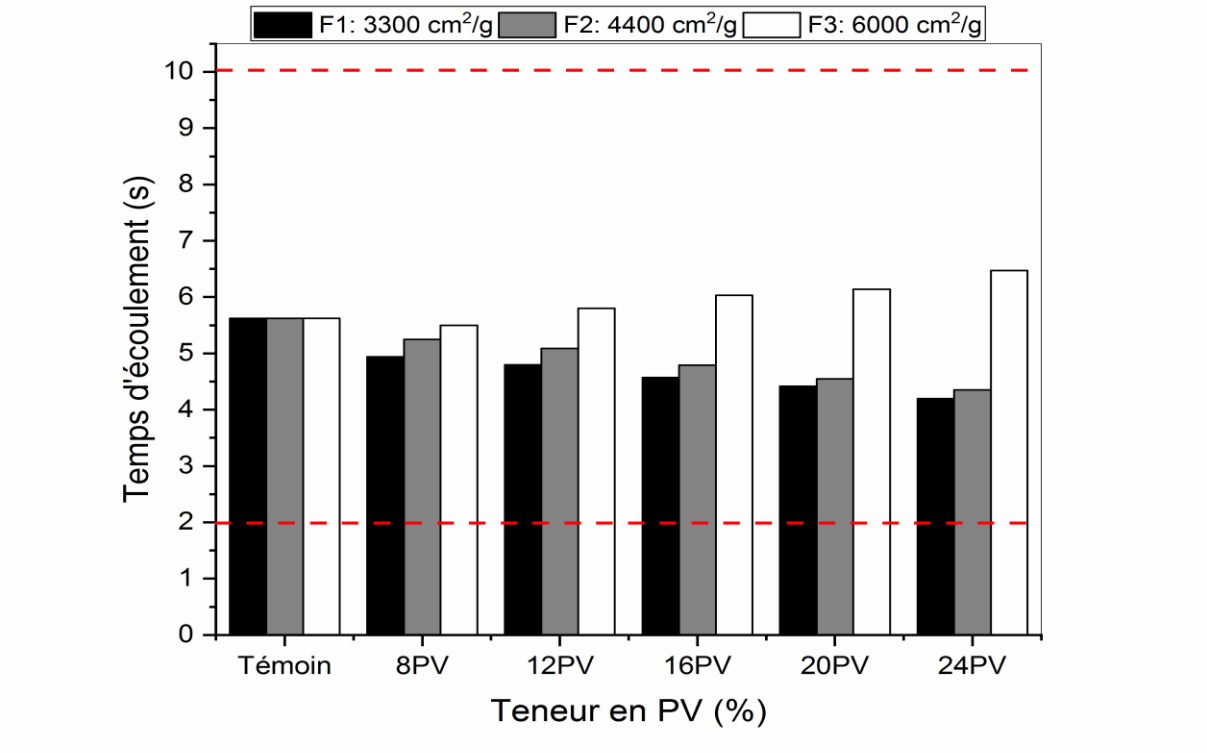


Figure IV.2: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de PV avec différentes finesses.

IV.3.2. Influence de la teneur et la finesse de la poudre de la brique PB sur l'ouvrabilité des MAP

Deux essais relatifs au mortier ont permis d'analyser l'effet de la teneur de substitution du ciment par la poudre de brique ainsi que l'effet de la variation de la finesse de l'addition sur les propriétés des mortiers autoplaçants à l'état frais. Le tableau IV.4 récapitule les résultats de l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

Tableau IV.4: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de PB.

Teneur (%)	**Finesse du PB,SSB (cm^2/g)**					
	3300		**4400**		**6000**	
	Etalement (mm)	Temps (s) V-funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-funnel
0	298	5,62	298	5,62	298	5,62
4	298	5,7	297	5,9	291	6,44
8	297	5,95	295	6,22	287	6,73
12	296	6,08	294	6,95	285	7,53
16	295	6,3	294	7,25	280	7,94
20	292	7,05	291	7,54	280	8

IV.3.2.1. Essai d'étalement au mini-cône

La variation de l'étalement des mortiers en fonction de leur composition est présentée dans la figure IV.3.
On peut observer que les valeurs d'étalement diminuent avec l'augmentation de la teneur en PB ; cette variation est notée pour les trois finesses étudiées. Cette réduction de la maniabilité peut être attribuée à la forte demande en eau, l'angularité et la surface rugueuse des particules de PB.

Le MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) avec une teneur faible de PB avait l'étalement le plus élevé. Pour le MAP à 4% et 8%PB, l'étalement était similaire au MAP témoin. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Renjuan et al.[254] ou il a été confirmé que l'introduction du PB à 5% donne des valeurs d'étalement similaires à ceux de témoin.Cependant, à mesure que le niveau de remplacement augmente, il y a eu une légère diminution de l'étalement.

Il est clair aussi que la finesse de la PB influe légèrement sur l'ouvrabilité. En effet, on peut constater que l'augmentation de la surface spécifique de la PB conduit à une diminution de l'étalement du mortier.

A titre d'exemple, pour un taux de substitution de 20%, on enregistre une diminution de l'étalement de l'ordre 0,35% et 4,1% pour les MAP à base de PB d'une finesse de 4400 cm^2/g et 6000 cm^2/g respectivement en comparaison à celui contenant de la PB broyée à 3300 cm^2/g. Il est à noter aussi que tous les mortiers étudiés ont présenté un aspect homogène (sans ressuage) quelque soit les pourcentages de substitution et les finesses de mouture de la poudre de brique.

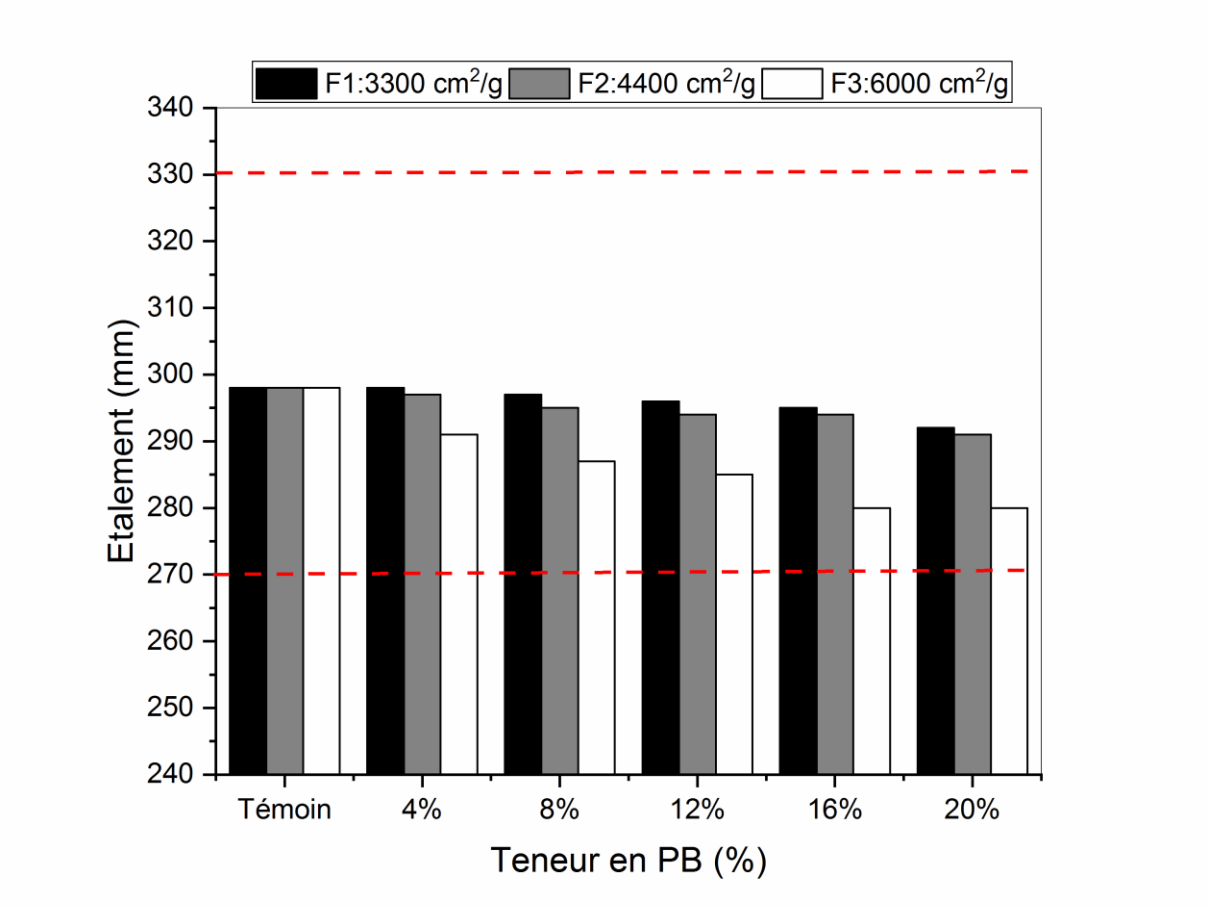


Figure IV.3: Variation de l'étalement des MAP à base de PB avec différentes finesses.

Ce résultat est similaire à celui trouvé par Zhiming et al.[255], où il a été confirmé que l'ajout de la poudre de brique provoque une chute de l'étalement des mortiers. Cette diminution est plus remarquable pour un taux de substitution de 30%.

Le même comportement de la poudre de brique a été observé par Ge et al.[100] où l'auteur a confirmé que cette addition affecte les propriétés à l'état frais des compositions de béton. Irki et al.[120] ont également étudié l'effet de la poudre de brique sur les propriétés des MAP. Les résultats ont montré que la substitution du ciment par la poudre de brique avec une teneur de 20% diminue l'ouvrabilité du mortier autoplaçant d'environ 3%.

IV.3.2.2. Essai d'écoulement au V-Funnel

L'influence de la poudre de brique sur le temps d'écoulement au V-Funnel est présentée sur la figure IV.4. Les résultats ont montré une augmentation du temps d'écoulement avec l'accroissement de la teneur en PB, c'est aussi le cas pour la finesse, plus on augmente la finesse plus le mélange prend plus de temps pour s'écouler et cela augmente la viscosité plastique.

En effet, pour les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g), l'augmentation du taux de substitution du ciment de 0% à 4%,8%,12%,16% et 20% de la PB conduit à un temps d'écoulement supérieur de 1,42% ,5,87%, 8,18%,12,09% et 25,44% comparé à celui du mortier témoin.

Ces résultats s'accordent avec ceux trouvés par Iqbal et al.[256] où l'accroissement de la teneur en PB provoque une augmentation du temps d'écoulement à l'entonnoir en V des BAP. Par ailleurs, Karats et al. [139] ont démontré qu'une substitution de 20% de PB présente une augmentation de temps d'écoulement de 10,2s à 11s.
Cependant, Si-ahmed et al. [257] ont observé que l'incorporation de 5% ,10% et 15% de PB réduit le temps d'écoulement des MAP. Par contre, l'utilisation de 20% et 25% de PB augmente le temps d'écoulement des mélanges. A partir de cette figure, on peut également constater que plus la poudre de brique est fine plus le temps d'écoulement au V- Funnel est important. A titre d'exemple, pour une substitution de 20%, le temps d'écoulement passe de 7,05s à 7,54s et 8s pour les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g), MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) respectivement.

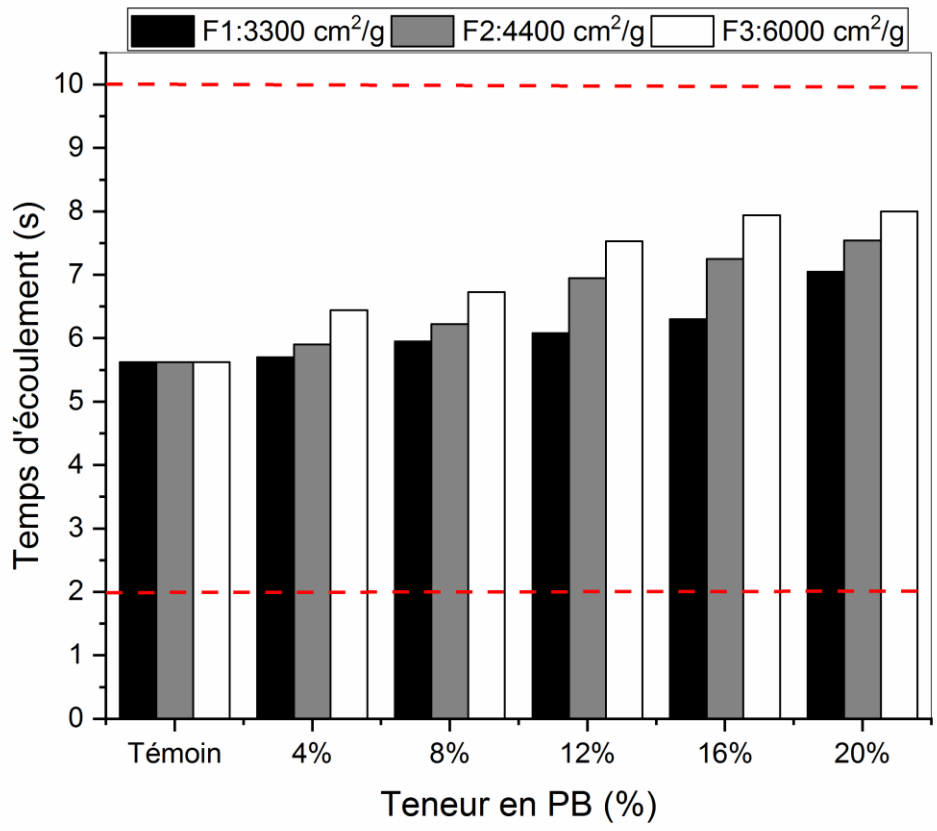


Figure IV.4: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de PB avec différentes finesses.

IV.4. Influence des PV et PB comme ajout cimentaire sur la résistance à la compression des MAP

IV.4.1. Influence du PV sur le développement de la résistance à la compression

Après la confection des éprouvettes de mortiers, la moitié a été conservée dans un bac d'eau à 20°C, et l'autre moitié laissée à l'air libre jusqu'à l'échéance de l'essai.

De même que pour les éprouvettes confectionnées à base de la poudre de brique, la mesure de la résistance en compression a été effectuée à jeune âge, moyen et à long terme jusqu'à 400 jours. Pour chaque finesse étudiée, le ciment est substitué par 8%, 12%,16%,20% et 24% de PV.

IV.4.1.1. Résistance à la compression des MAP-PV conservés dans l'eau

Les figures IV.5, IV.6, IV.7 expriment les résistances en compression des (MAP-PV) avec les trois finesses F_1, F2 et F3 pour des éprouvettes conservées dans l'eau à 7, 14, 28, 56, 90 et 400 jours.

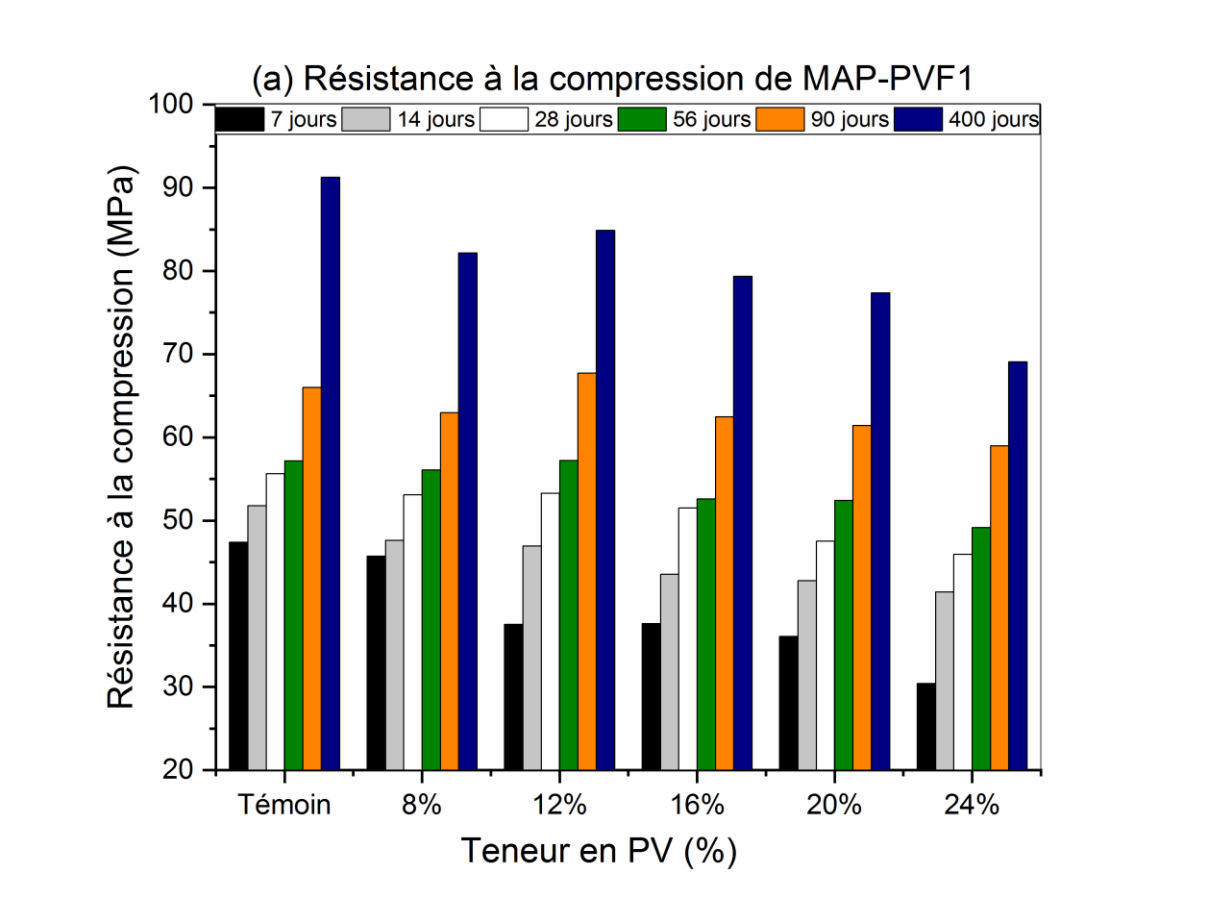


Figure IV.5: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g).

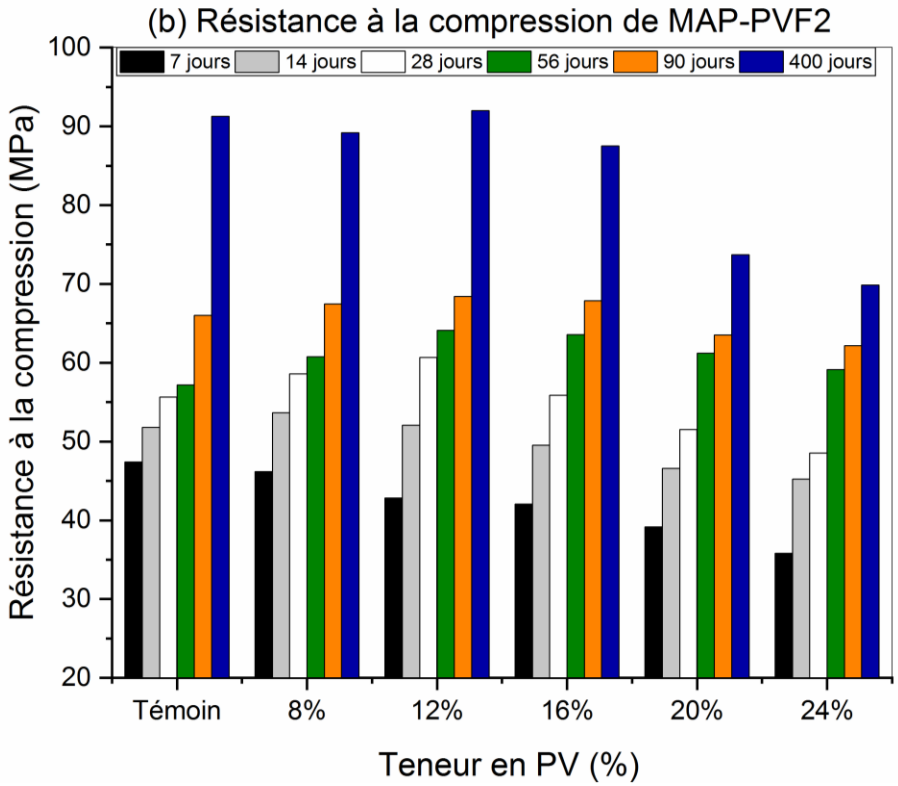


Figure IV.6: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g).

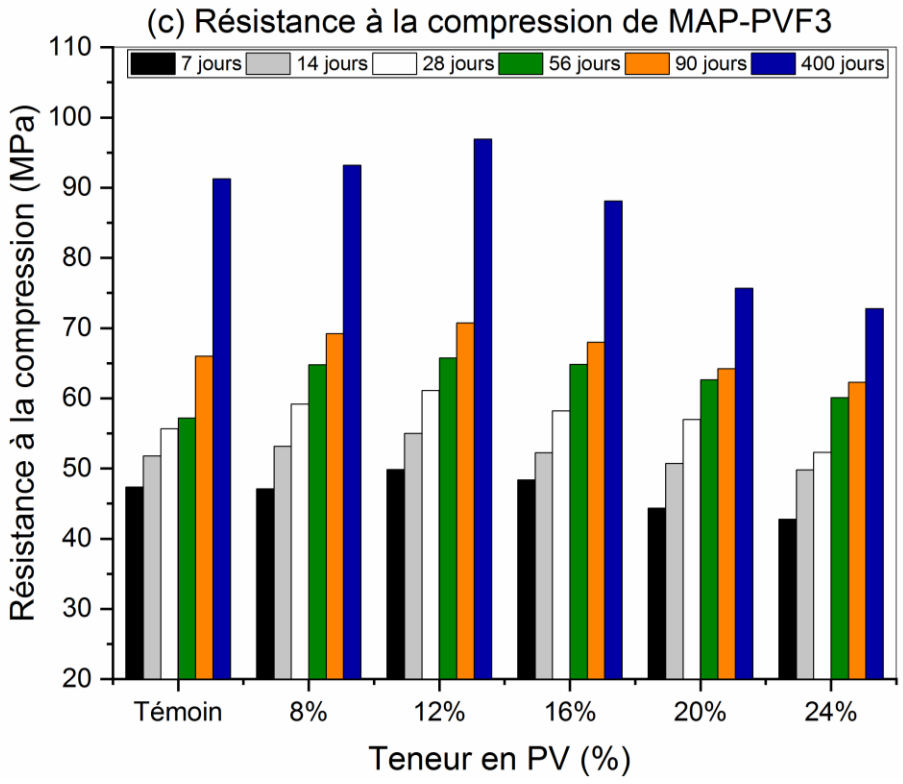


Figure IV.7: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g).

Au regard dans les figures IV.5, IV.6, IV.7, on constate que la résistance à la compression des MAP-PV augmente avec l'âge et avec l'augmentation de la finesse et diminue avec l'augmentation de la teneur en PV.
Les résultats obtenus montrent que la substitution du ciment par du PV engendre une baisse de la résistance en compression des MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) à jeune âge. La diminution de résistance est de l'ordre de 4%, 21%, 21%, 24% et 36% à l'âge de 7 jours, 8 %, 9%, 16%, 17% et 20 % à l'âge de 14 jours, 5%, 4%, 7%, 15% et 17% à l'âge de 28 jours respectivement, pour les compositions de mortiers contenant 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de PV comparé au mortier témoin. Une amélioration de la résistance en compression est observée à long terme**.**

Pour les compositions des MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) on peut observer qu'à jeune âge, Ces MAP présentent des résistances similaires à ceux du contrôle, sauf pour les taux de substitution de mortier (8%,12% et 16%) les résistances sont supérieurs à ceux de contrôle. Une augmentation de l'ordre de 2 MPa, 4 MPa et 1 MPa à 14 jours, 4 MPa, 6 MPa et 3 MPa d'augmentation à 28 jours de cure a été observée pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) contenant 8%,12% et 16% de PV respectivement. Des résultats similaires ont été reportés par Yuanbo et al.[258] où ils ont montré que l'introduction de PV provoque une augmentation des résistances à 28 jours. Une résistance maximale a été obtenue pour une substitution de 5% de PV de 60 MPa à 28 jours. De plus, Oznur et al. [48] ont rapporté qu'une teneur de 20 % de PV montre une résistance à la compression de 72 ,33 MPa à 28 jours.
L'effet de la finesse de PV est bien observé à partir de 56 jours de cure où une augmentation de résistance est enregistrée avec l'augmentation de la surface spécifique du PV. Une amélioration de 7 MPa et 9 MPa a été notée à 12% de PV pour des surfaces spécifiques de 4400 cm^2/g et 6000 cm^2/g comparée à la composition du 12% PV d'une finesse de 3300 cm^2/g. A long terme une amélioration de la résistance en compression remarquable a été observée pour les MAP-PVF2 et MAP-PVF3. Cela est dû à la réaction pouzzolanique qui pourrait prendre lieu dans les stades ultérieurs.

La résistance à la compression à l'âge de 90 jours augmente de 67 MPa à 69 MPa et 71 Mpa pour le mélange 12PVF2 (4400 cm^2/g) et 12PVF3 (6000 cm^2/g) comparée à la composition du 12PVF1 (3300 cm^2/g). Cette augmentation de la résistance à la compression pourrait être attribuée à l'effet du remplissage où les particules de PV remplissent l'espace entre les particules de ciment , et à la réaction pouzzolanique de la phase amorphe (SiO2) du PV avec l'hydroxyde de calcium C-H qui produit le C-S-H secondaire, ceci conduit à un raffinage des pores et micropores pour donner une matrice cimentaire plus dense [259].

A 400 jours, l'augmentation de la finesse du PV de 3300 cm^2/g à 4400 cm^2/g et 6000 cm^2/g provoque une augmentation de la résistance en compression très remarquable. A titre d'exemple, pour une substitution de 12% de PV, l'augmentation est de l'ordre de 7 MPa et 12 MPa respectivement par rapport au mélange 12%PVF1. Des résultats similaires ont été reportés par Mettwaly et al. [37] où ils ont montré que l'introduction de PV avec une finesse de 6500 cm^2/g provoque une augmentation des résistances à long terme (91 jours). Une résistance maximale a été obtenue pour une substitution de 10% de PV. Selon Nassar et al.[42] la résistance à la compression des spécimens contenant de la PV est similaire à celle du mortier ordinaire à 28 jours, la résistance en compression des éprouvettes contenant de la PV est relativement augmentée, et de plus elle est significativement accrue à des âges de 90 ,156 et 300 jours, pour les deux rapports E/L (0,36 et 0,5). En effet, il a été rapporté que la composition chimique et la finesse du PV affectent de manière significative la réactivité du PV et que la réaction pouzzolanique du PV augmente avec l'augmentation de sa finesse [54].

D'autre part Islam et al.[46] ont confirmé que l'ajout de la PV améliore la résistance à la compression à long terme. L'incorporation de 10% de PV fait augmenter la résistance du mortier à 90 jours. A 180 jours, le 15% présente la plus grande résistance à la compression dans les mortiers avec du PV. A 365 jours le PV au taux de 20% a donné une résistance à la compression maximale, soit 8% de plus que le mortier de contrôle.

IV.4.1.2. Résistance à la compression des MAP-PV conservés à l'air libre

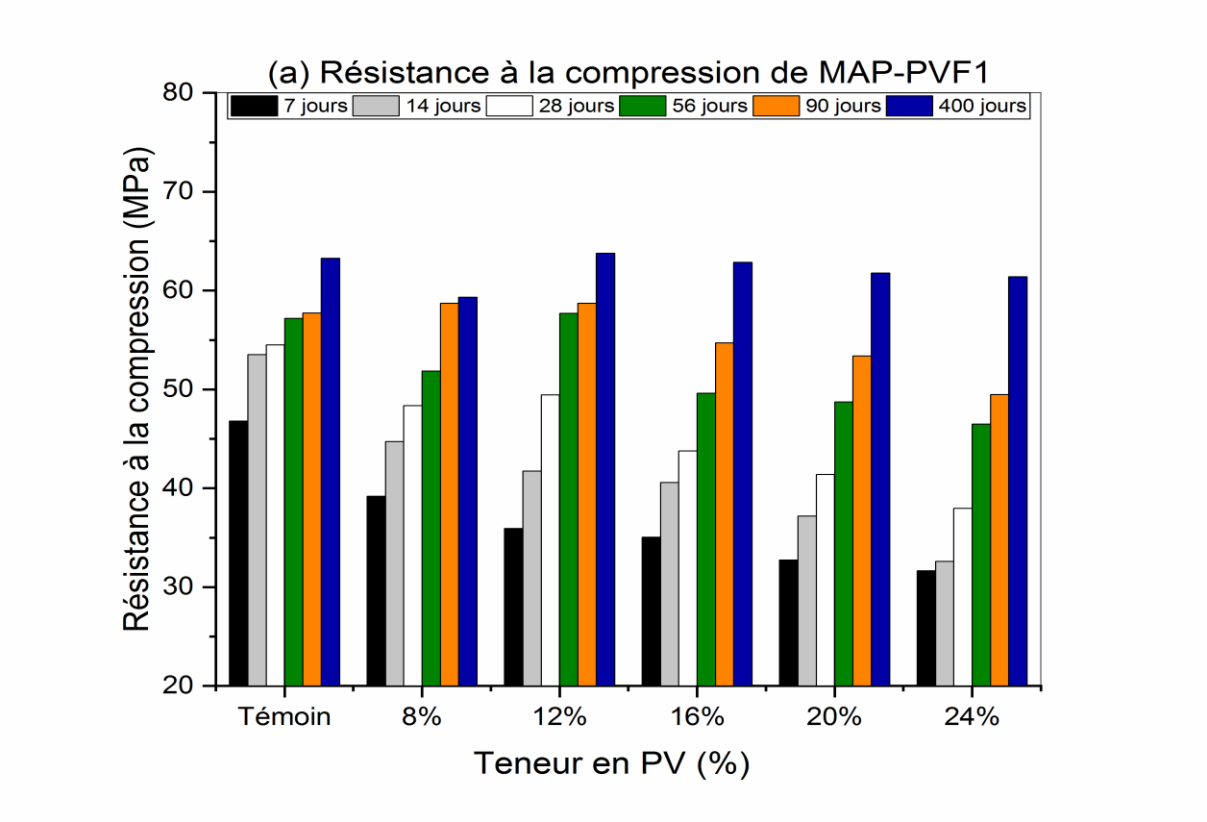


Figure IV.8: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g).

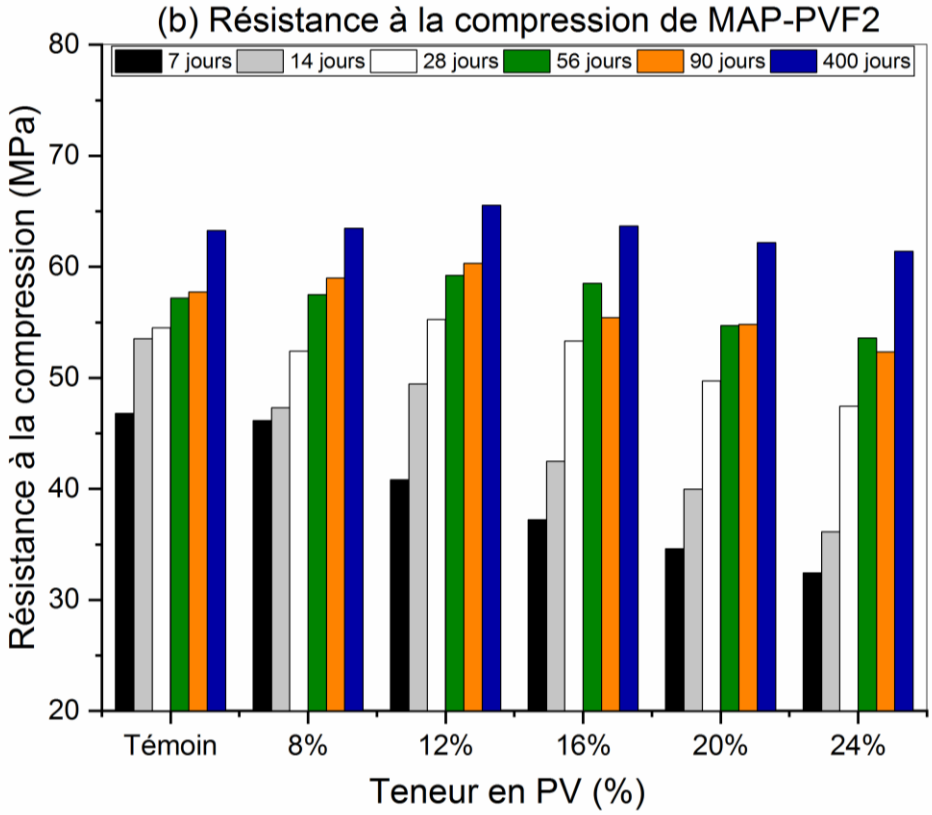


Figure IV.9: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g).

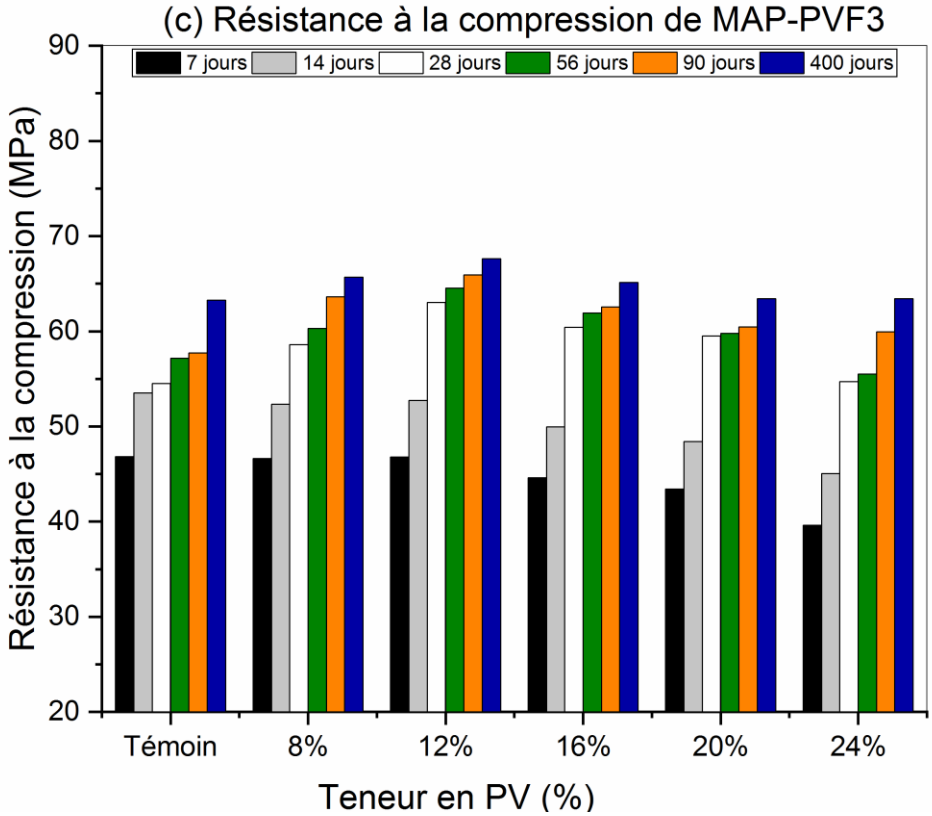


Figure IV.10: Evolution de la résistance en compression des MAP au PV (F3 : 6000 cm^2 /g).

D'après les figures IV.8, IV.9, IV.10, il est à remarquer que la résistance à la compression augmente avec l'âge et avec l'augmentation de la finesse comme pour les MAP-PV conservé dans l'eau.
Par rapport au mélange de contrôle, les mélanges MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) donnent des résistances à la compression inférieure à 7, 14 et 28 jours, alors qu'à 56, 90 et 400 jours le MAP 12PVF1 a donné des résistances supérieures.

Pour les mélanges MAP-PVF2 (4400 cm^2/g), on remarque une amélioration de la résistance à la compression à partir de 28 jours et qui continue à s'améliorer jusqu'à 400 jours. Une amélioration de 2 MPa et1 MPa a été notée à 56 jours pour les mélanges avec 12% et 16% de PV. A 90 jours, une amélioration de 1 MPa et 3 MPa a été notée pour les mélanges avec 8% et 12% de PV par rapport le mélange témoin.

L'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation du niveau de remplacement du ciment a été observée pour les mélanges MAP-PVF3 (6000 cm^2/g). Les mélanges avec 8%, 12% et 16% de PV donnent des résistances supérieures à celle de contrôle à 28, 56, 90 et 400 jours. Une amélioration de 7 MPa, 4 MPa et 2 MPa est observée pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) avec 8%, 12% et 16% de PV comparé aux MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) à 400 jours.

Les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) à divers niveaux de remplacement ont montré des résistances plus élevées que les mélanges MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF1 (3300 cm^2/g).
Cependant à partir de 20% de remplacement on observe une réduction progressive du développement de la résistance pour tous les MAP étudiés. Du même les MAP-PV conservés dans l'eau sont plus performants et présentent des résistances supérieures aux MAP-PV conservés à l'air libre

IV.4.2. Influence du PB sur le développement de la résistance à la compression

Pour les éprouvettes confectionnées à base de la poudre de brique, la mesure de la résistance en compression a été effectuée à 7, 14, 28, 56, 90 et 400 jours. Pour chaque finesse étudiée, le ciment est substitué par 4%, 8%,12%,16% et 20% de PB.

IV.4.2.1. Résistance à la compression des MAP-PB conservés dans l'eau

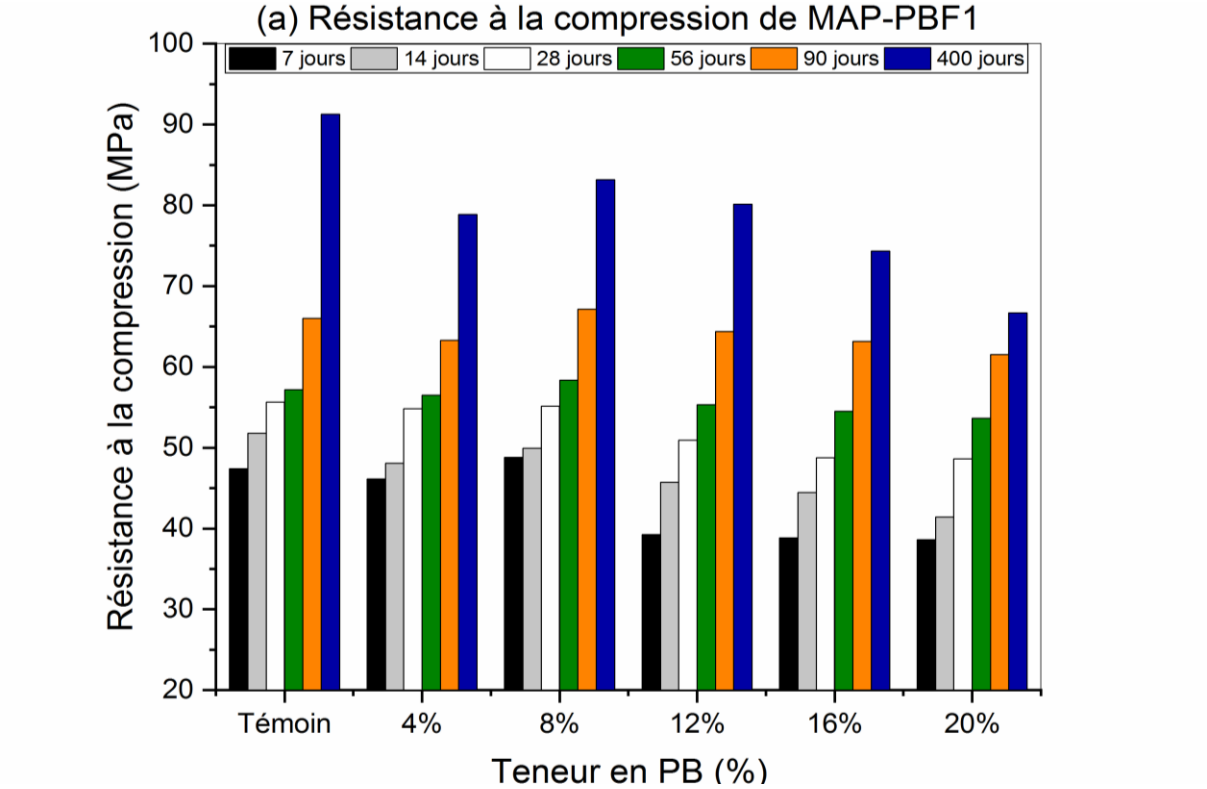


Figure IV.11: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g).

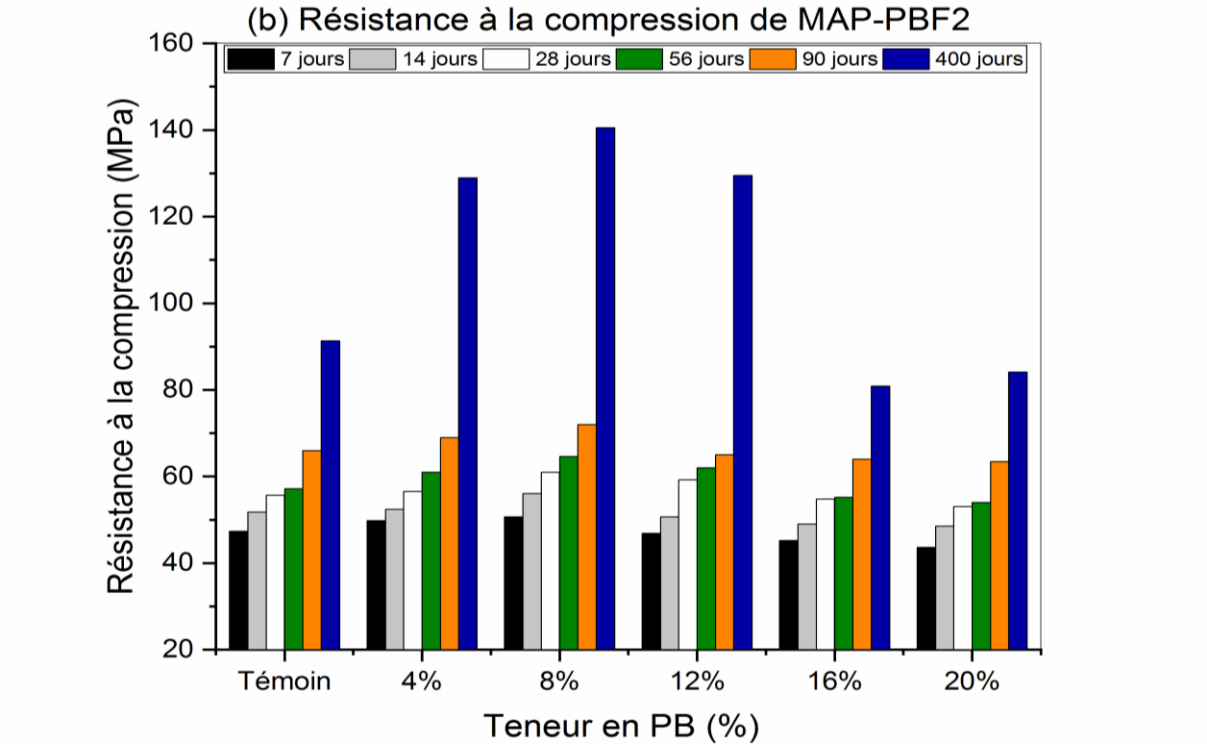


Figure IV.12: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g).

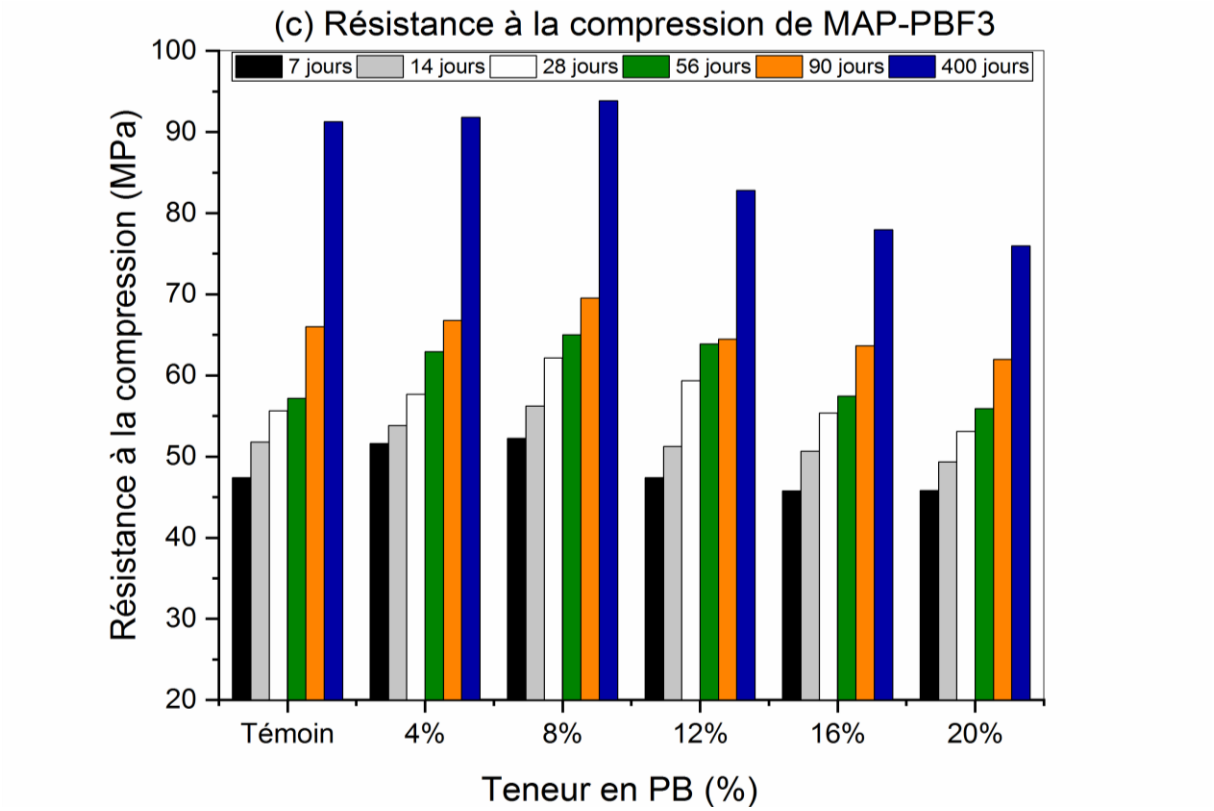


Figure IV.13: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g).

L'effet de la teneur et la finesse de la poudre de brique sur la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les éprouvettes conservées dans l'eau est présenté sur les figures IV 11, IV 12 et IV13.

On peut constater que la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la teneur en PB, mais s'améliore avec l'augmentation de la finesse.
A l'issue de ces résultats, on peut observer que l'augmentation des taux de substitution du ciment par la PB engendre une diminution des résistances en compression à 7, 14 et 28 jours de cure pour les MAP-PBF1 (3000 cm^2/g). Pour les taux de substitution de 12%,16% et 20% de PB une diminution de résistance de l'ordre de 17%, 18% et 19% à 7 jours, et de 12%,14% et 20% à 14 jours respectivement, est observée.

Pour les MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g), les résultats montrent des résistances comparables à ceux de témoin a jeune âges, sauf pour les MAP confectionné avec 4% et 8% de PB qui ont montré une légère augmentation de la résistance par rapport au mélange de contrôle à 7, 14 et 28 jours. Karatas et al. [139] ont enregistré une amélioration de la résistance à 3 et 7 jours avec 5% et 10% de la poudre de brique comme substituant du ciment. Ce qui s'explique par la forte activité pouzzolanique de la PB.
On peut observer que l'augmentation de la finesse de la poudre de brique à un effet positif sur la résistance en compression à long terme. Une amélioration de la résistance a été notée pour les MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g). A 56 jours et pour une substitution de 4%, 8% et 12% de PB une amélioration de l'ordre de 5 MPa, 6 MPa et 7 MPa et de 6 MPa, 7 MPa et 9 MPa pour les MAP-PBF2 et MAP-PBF3 comparée à celle développée par les MAP-PBF1 (3000 cm^2/g) respectivement.

A 90 jours, le remplacement de 4% et 8% de PB engendre une augmentation de l'ordre de 6 MPa et 5 MPa et de 4 MPa et 3 MPa pour les MAP-PBF2 et MAP-PBF3 respectivement comparée à celle développée par les MAP-PBF1 (3000 cm^2/g). Irki et al. [120] ont également constaté que plus la finesse de PB est élevée, plus la résistance à la compression est élevée.

Cette augmentation de résistance est probablement due à la grande surface spécifique de la poudre de brique qui peut aller jusqu'au double de celle de ciment qui favorise l'hydratation et qui a influence positive sur la résistance à la compression qui augmente; de plus il a un effet de remplissage des pores plus élevé, ce qui rend la microstructure des pâtes de ciment avec la poudre de brique plus dense et moins poreuse ; cela a également conduit à une amélioration des résistances en compression [133]. D'après Li et al. [112] il y a des phases amorphes dans la poudre de brique. Ces phases amorphes et SiO2 actives sont activées par l'hydratation du ciment produit Ca(OH)2 (CH), avec lequel ils réagissent ensuite, l'effet pouzzolanique de la PB entre également en jeu, quand plus de PB est mélangé, il y a plus de phases amorphes et de SiO2 actifs disponibles. Ainsi, la réaction pouzzolanique se produit dans une plus grande mesure, et plus de nouvelles phases d'hydratation sont formées.

A 400 jours les MAP-PBF2 montrent des résistances supérieures aux MAP-PBF3. Le MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) avec 8% de PB avait la résistance à la compression la plus élevée. Un taux de 20 % de PB provoque des chutes de résistances des MAP pour tous les âges et pour les trois finesses étudiées.
Selon Abib et al. [260], l'incorporation de 5 % de PB donnait une résistance à la compression similaire à celle des échantillons sans PB. Du même Silva et al. [261] ont observé que l'incorporation de 25% de PB, fait augmenter la résistance du BAP à 180 et 360 jours par rapport au BAP de référence. Cependant, Mansor et al. [262] ont observé que l'utilisation de la PB affecte négativement la résistance à la compression des BAP. Une réduction a été enregistré pour des taux d'incorporation de 5 à 50% par paliers de 5%.

IV.4.2.2. Résistance à la compression des MAP-PB conservés à l'air libre

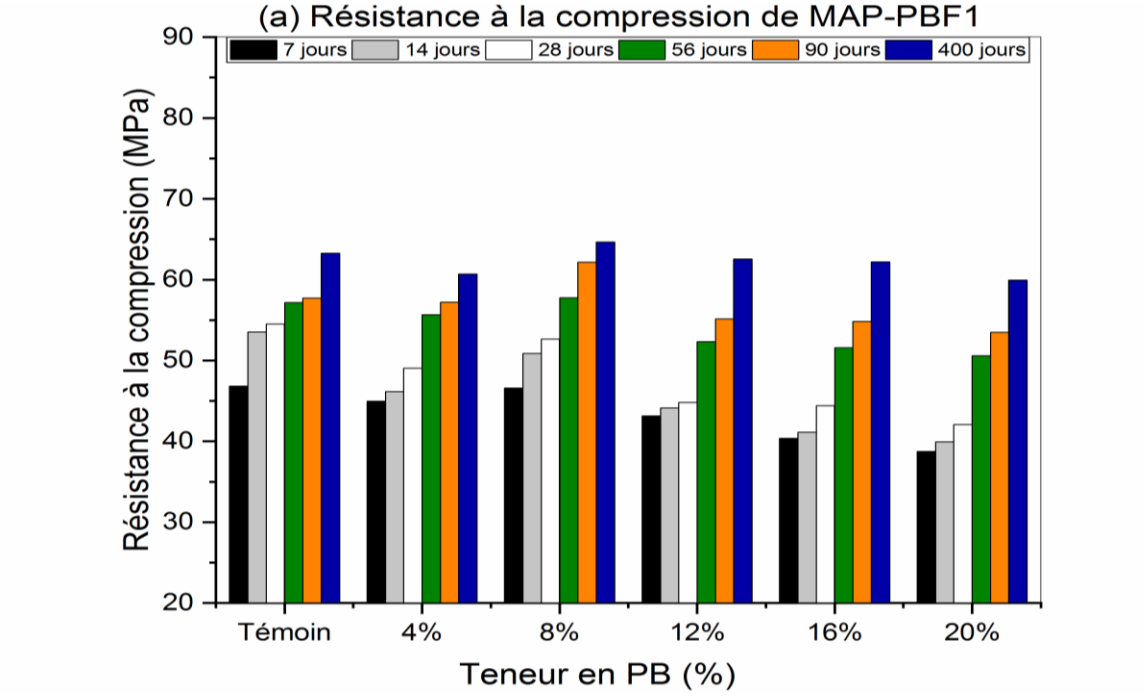


Figure IV.14: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g).

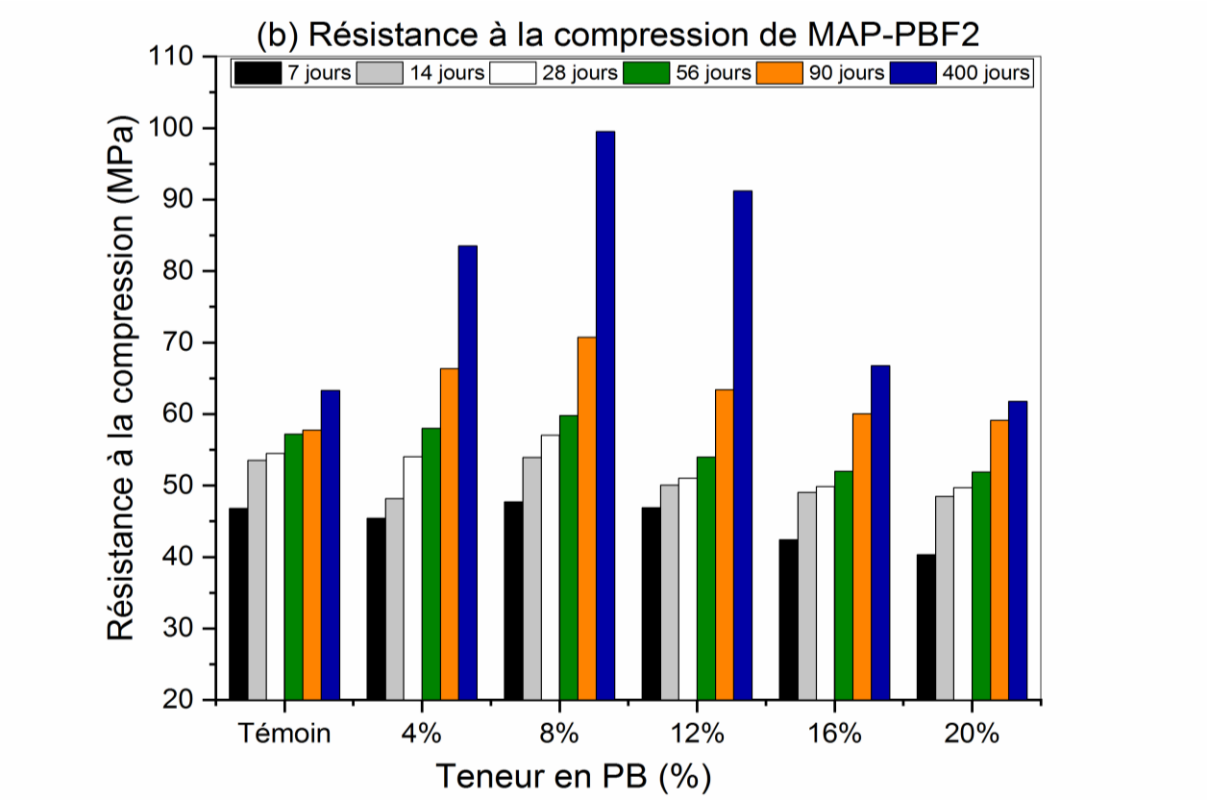


Figure IV.15: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g).

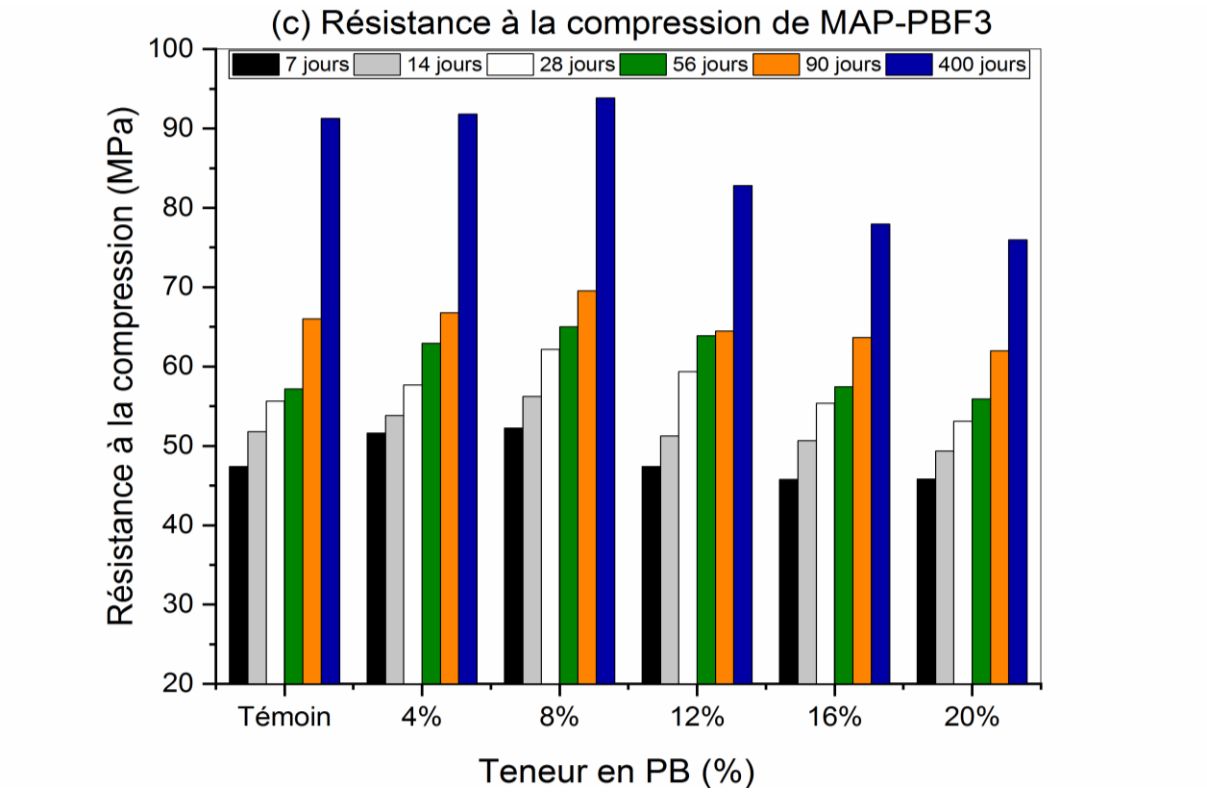


Figure IV.16: Evolution de la résistance en compression des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g).

Les résultats de la résistance à la compression des MAP-PB conservés à l'air libre en fonction de la teneur et la finesse de la PB sont présentés sur les figures IV.14, IV.15 etIV.16.

On constate de ces résultats,que la résistance diminue avec l'augmentaion de taux de substitution et s'améliore avec l'age et avec l'augmentation de la surface spécifique, comme pour les éprouvettes conservées dans l'eau.

Les résultats montrent une baisse de la résistance en compression des MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) et MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) à jeune âge (7, 14 et 28 jours) , ceci pour tous les mélanges, sauf pour le mélange avec 8% de PB qui a marqué une augmentation de la résistance à jeune âge pour une finesse de 4400 cm^2/g. Pour les compositions de MAP-PBF1 (3300cm^2/g) contenant 4%, 8%, 12%,16% et 20% de PB, la diminution de résistance est de l'ordre de 4%, 1%, 8%, 14% et 17% pour les éprouvettes conservées 7 jours et de 7%, 4%, 12%, 14% et 20% pour celles conservées 14 jours, respectivement par rapport au mélange de controle.

D'autre part, l'augmentation de la surface spésifique de PB rend les MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) plus résistants au jeune âge (7, 14 et 28 jours), ceci pour les mélanges avec 4% et 8% de PB où l'augmentation par rapport au mélange témoin pour le 8% de PB est de 3% à 7 jours, 2% à 14 jours, et 7% à 28 jours. La meme tendence obtenue par Iqbal et al.[256] qui ont démontré une augmentation de la résistance dès le plus jeune âge, c'est-à-dire 7 jours avec toutes les proportions de substitution de la poudre de brique .

À partir de 56 jours de cure, l'effet de la finesse de PB est bien observé où une augmentation de la résistance est enregistrée avec l'augmentation de la surface spécifique du PB.
A 90 jours, une amélioration de la résistance pour les MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) par rapport au MAP-PBF1 (3300 cm^2/g), cette amélioration est d'environ 10 MPa, 9 MPa et 8 MPa ,et de 8 MPa, 6 MPa et 7 MPa pour des substituotions de 4%, 8% et 12% de PB respectivement **.**

A 400 jours, tous les mélanges avec de la PB ont connus une amélioration de la résistance en compression, sauf pour les compositions à 20% de PB. Des études précédentes [263] ont rapporté que les meilleures résistances sont obtenues pour une substitution de 10% de la poudre de brique. D'autres chercheurs ont constaté que l'incorporation de 15% de PB est plus efficace [264].

Les MAP contenant de la PB à différentes finesses montrent une loi d'évolution différente de la résistance à la compression. le MAP-PBF3 montre une résistance à la compression la plus élevée jusqu'à 56 jours. Cependant, le MAP-PBF2 manifeste la valeur la plus élevée de la résistance à la compression à 90 et 400 jours.

IV.5. Influence de la PV et PB sur le développement de la Résistance à la flexion

IV.5.1. Résistance à la flexion des MAP-PV conservés dans l'eau

Le développement de la résistance à la flexion des mortiers autoplaçants conservés dans l'eau, en fonction du taux de substitution du PV pour chaque finesse étudiée, est représenté sur les figures IV.17, IV.18 et IV.19.

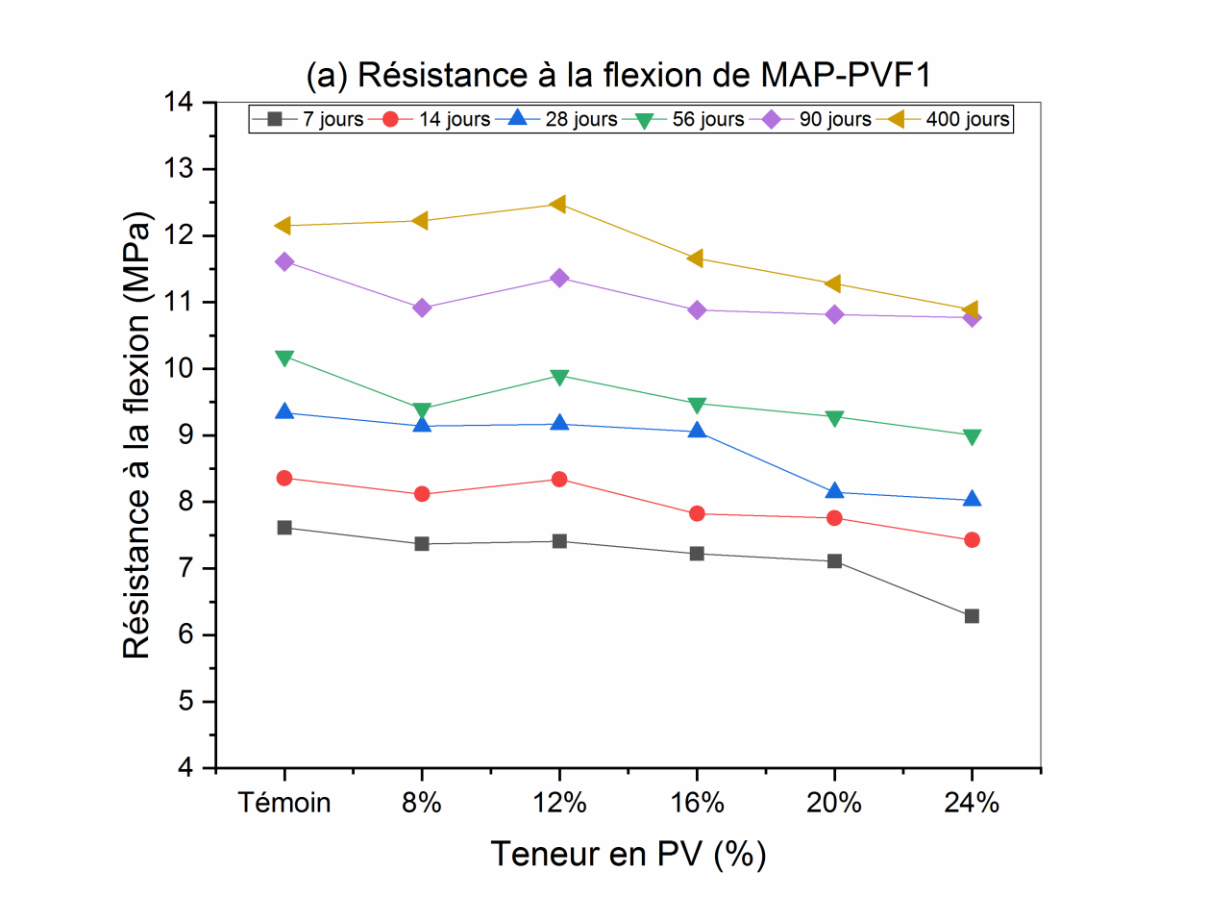


Figure IV.17: Résistance à la flexion des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g).

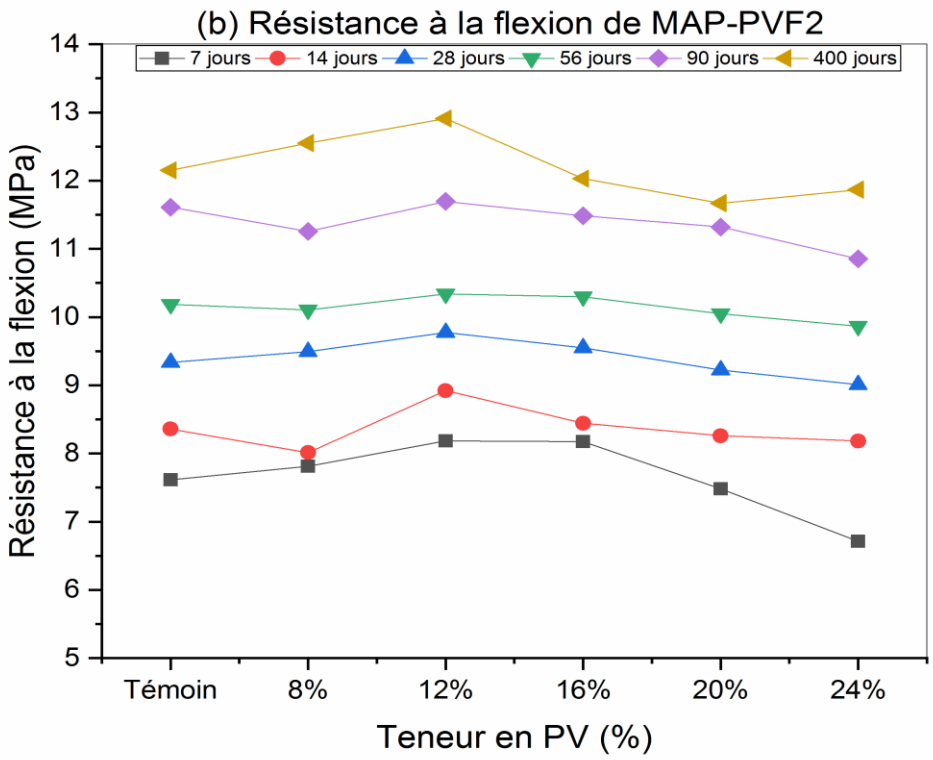


Figure IV.18: Résistance à la flexion des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g).

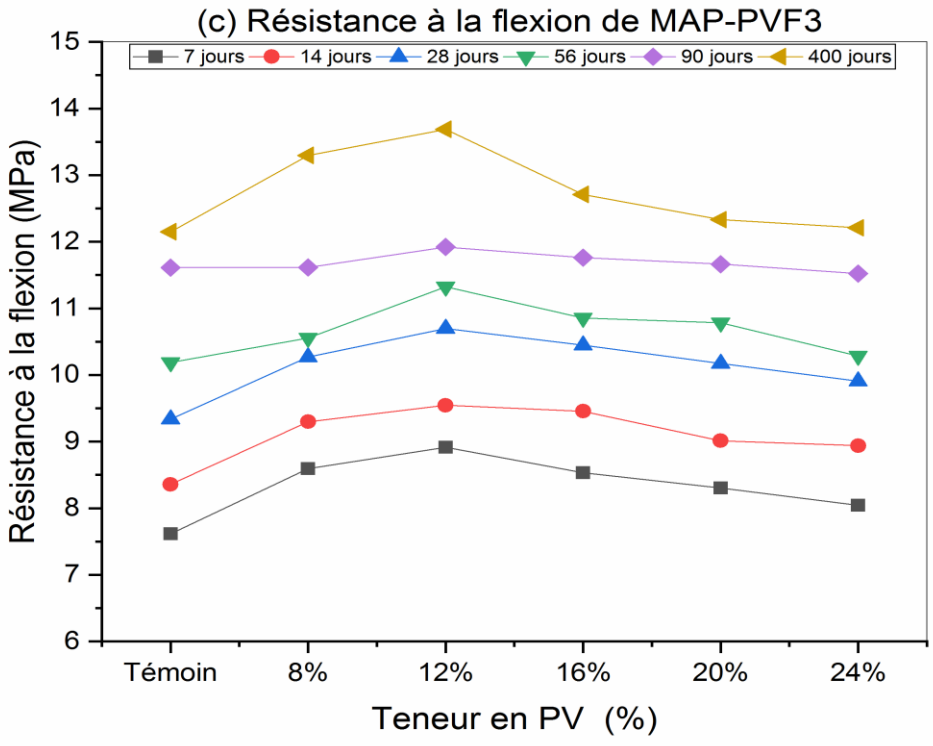


Figure IV.19: Résistance à la flexion des MAP au PV (F3 : 6000 cm^2 /g).

La résistance à la flexion diminue avec le taux d'incorporation de PV et augmente en fonction de l'âge et avec l'augmentation de la finesse.
Les résultats montrent une baisse de la résistance à la flexion pour les MAP-PV F1 (3300 cm^2/g) pour tous les âges. Une diminution de l'ordre 3% ; 2% ; 5% ; 7% et 17% par rapport au MAP témoin à 7 jours, et de 3%; 1% ; 6% ; 7%, et 11% à 14 jours, alors qu'à 28 jours la diminution est de 2% ; 2% ; 3% ; 13% et 14% pour les MAP contenant 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de PV respectivement. A long terme, une amélioration remarquable de la résistance à la flexion des MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) mais reste toujours inférieur au MAP témoin.
Une augmentation de la résistance a été enregistrée avec l'augmentation de la surface spécifique, pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) ; l'amélioration est à remarquer dès le plus jeune âge. Les résistances à la flexion de tous les mélanges de MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) pour tous les ages dépassent celles du contrôle. Alors que pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) seuls les mélanges 8%, 12% et 16% de PV ont des résistances supérieures à ceux du contrôle pour 7 à 400 jours de conservation dans l'eau.

À 56 jours, une amélioration de 8%, 4% et 9% est notée pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et de 12%, 14% et 15% pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) comparé au MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) pour des taux de substitution de 8PV, 12PV et 16PV respectivement.

L'augmentation de la finesse du PV de 3300 cm^2/g à 4400 cm^2/g et 6000 cm^2/g engendre une augmentation de 6%, 5% et 8% à 90 jours pour les mélanges 8PV, 12PV et 16PV respectivement.

Le mélange PV à 12 % a donné la résistance à la flexion la plus élevée. La résistance à la flexion du MAP avec 12% PVF3 (6000 cm^2/g) à 400 jours révèle une augmentation jusqu'à 3 MPa par rapport au MAP-PVF1 (3300 cm^2/g). Pour un taux plus élevé du PV (24%), une baisse de la résistance est observée. Ceci confirme les résultats obtenus par Mahdi et al. [253] qui ont montré que l'incorporation de 7,5%, 15% et 22,5% de la poudre de verre, fait augmenter la résistance à la flexion du béton autoplaçant de 3.92% ; 9.8% et 17.65% par rapport au BAP de contrôle. Mais au-delà de 22,5% de PV, une diminution d'environ 3,92% est observée.

L'augmentation de la résistance à la flexion peut être attribuée à l'augmentation de la liaison de l'interface, zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats et le raffinement de la porosité [262,255]. Ce constat témoigne de l'effet bénéfique de la poudre de verre dans l'amélioration des propriétés mécaniques.

IV.5.2. Résistance à la flexion des MAP-PV conservés à l'air libre

Les figures IV.20, IV.21 et IV.22 présentent les résultats de la résistance à la flexion des MAP-PV conservés à l'air libre.

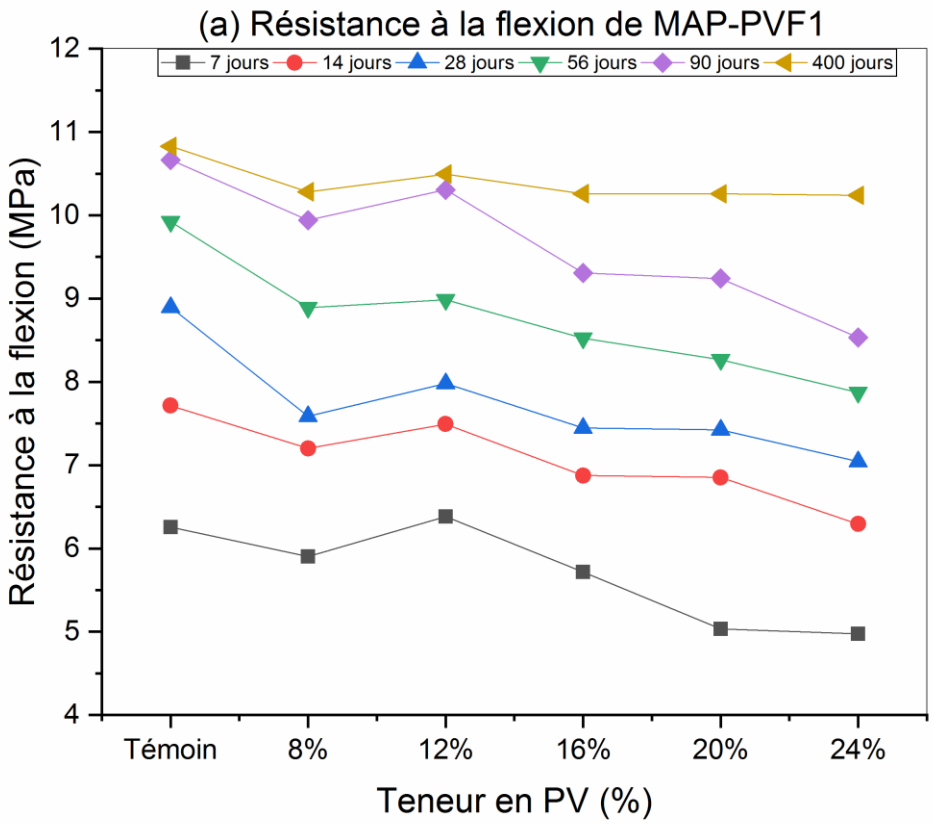


Figure IV.20: Résistance à la flexion des MAP au PV (F1 : 3300 cm^2 /g)

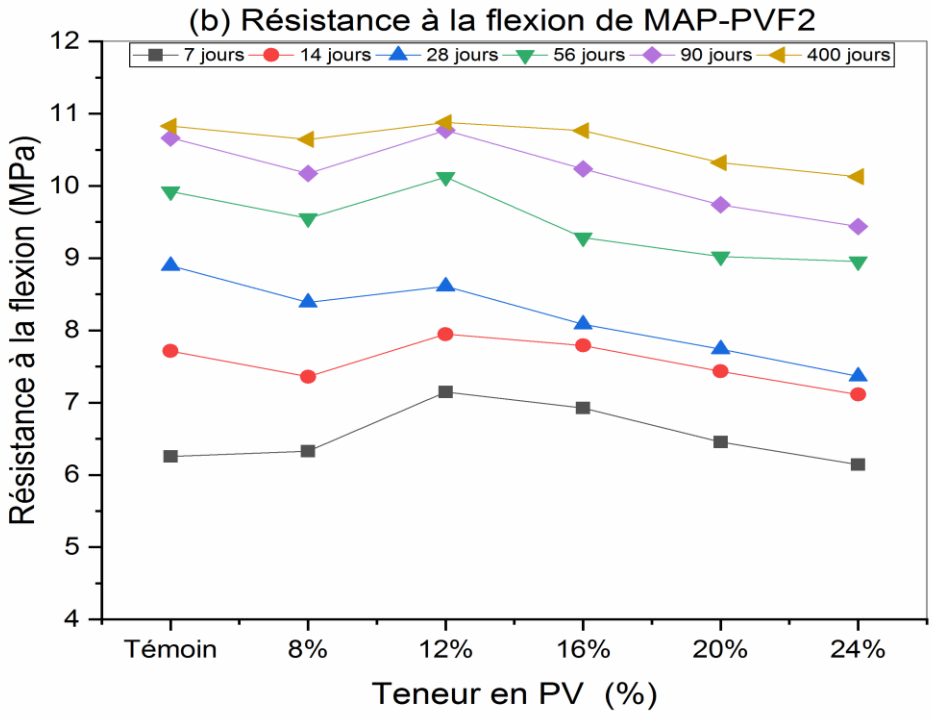


Figure IV.21: Résistance à la flexion des MAP au PV (F2 : 4400 cm^2 /g).

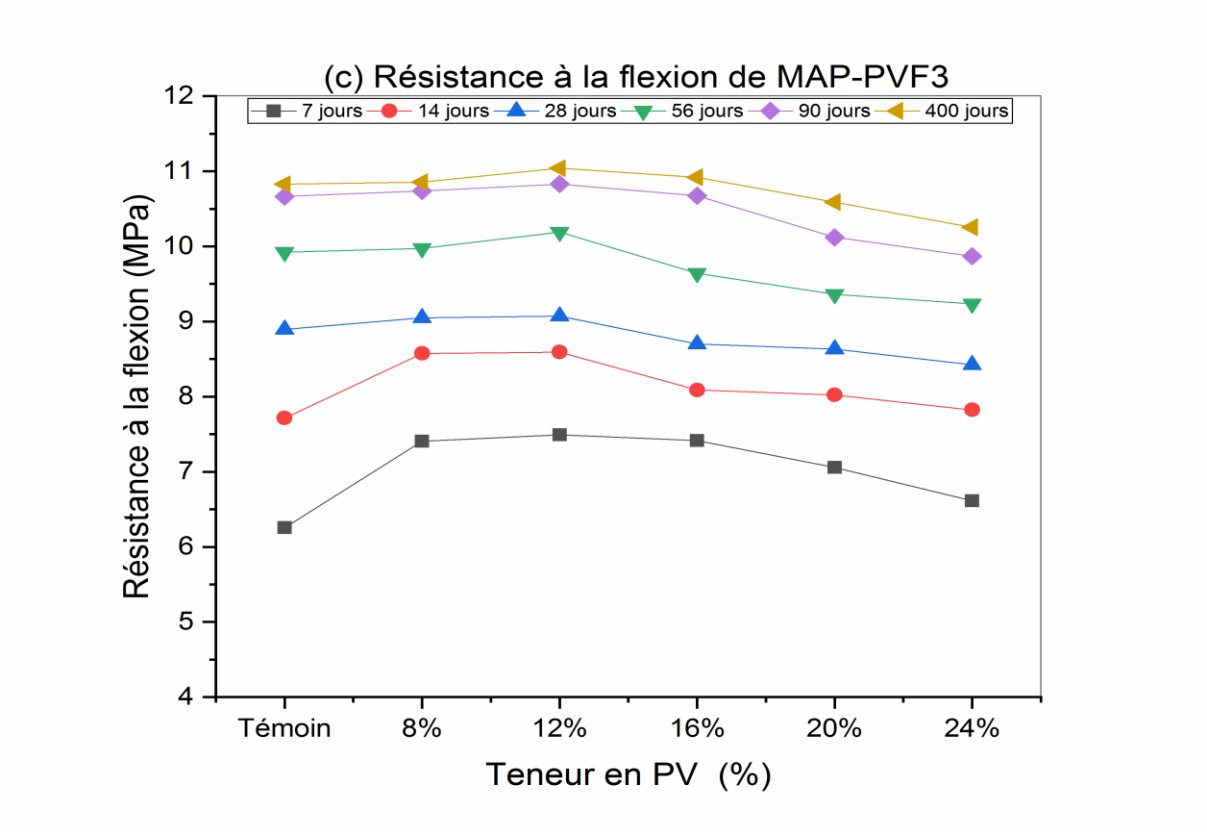


Figure IV.22: Résistance à la flexion des MAP au PV (F3 : 6000 cm^2 /g).

La résistance à la flexion des mortiers conservés à l'aire libre suit un comportement similaire à ceux conservés dans l'eau.

Il est observé qu'au fur et à mesure que l'âge de durcissement et la finesse de la poudre de verre augmentent, la résistance à la flexion augmente également. Tandis que la résistance décroit à mesure que le taux de substitution augmente.
Les valeurs de la résistance en flexion des MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) sont inférieures à celle du MAP témoin pour tous les âges. Sauf pour le 12% PV qui montre une légère amélioration de la résistance à tous les âges.
En outre, le MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) a présenté des résistances à la flexion similaire à celle du MAP témoin à 7,14 et 28 jours, avec une amélioration à 56, 90 et 400 jours pour le 12% de PV.

Les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) ont montré des résistances en flexion plus élevée qu'au MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF1 (3300 cm^2/g). Le MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) a présenté une amélioration de résistance de 25% ;17% et 29% à 7 jours , et de 19% ;15% et 17% à 14 jours, et de 19% ;14% et 17% à 28 jours pour des taux de substitution de 8PV,12PV et 16PV respectivement, comparé au MAP-PVF1 (3300 cm^2/g). Cet effet positive à jeune âge, se continue à long terme, ou une augmentation de 12% ; 14% et 13% à 56 jours, et de 8% ; 5% et 15% à 90 jours, et de 6% ;5% et 7% à 400 jours est observé pour les mélanges 8PV, 12PV et 16PVF3 respectivement, par rapport au MAP-PVF1 (3300 cm^2/g).

Il est a noté que la meilleure résistance à la flexion, est observée pour le MAP avec 12% de la poudre de verre, avec une valeur d'environ 11 MPa à 400 jours.

Quand le niveau de remplacement du ciment dépasse 16%, la résistance à la flexion diminue est ceci pour tous les MAP-PV étudiés. Selon les recherches d'Abdullah et al. [73] l'incorporation de 10% de la poudre de verre dans un béton ordinaire est plus efficace à 28 jours avec une amélioration de 6,57%, contrairement aux Jangid et al. [72] et Chikhalikar et al. [74] qui ont montré qu'un taux de 20% de PV semble être optimal pour le développement de la résistance à la flexion du béton.

IV.5.3. Résistance à la flexion des MAP-PB conservés dans l'eau

Les résultats de la résistance à la flexion pour les MAP contenants 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de la poudre de brique comme substituants au ciment, en fonction de la finesse et de l'âge du mortier conservés dans l'eau sont présentés sur les figures IV.23, IV.24 et IV.25.

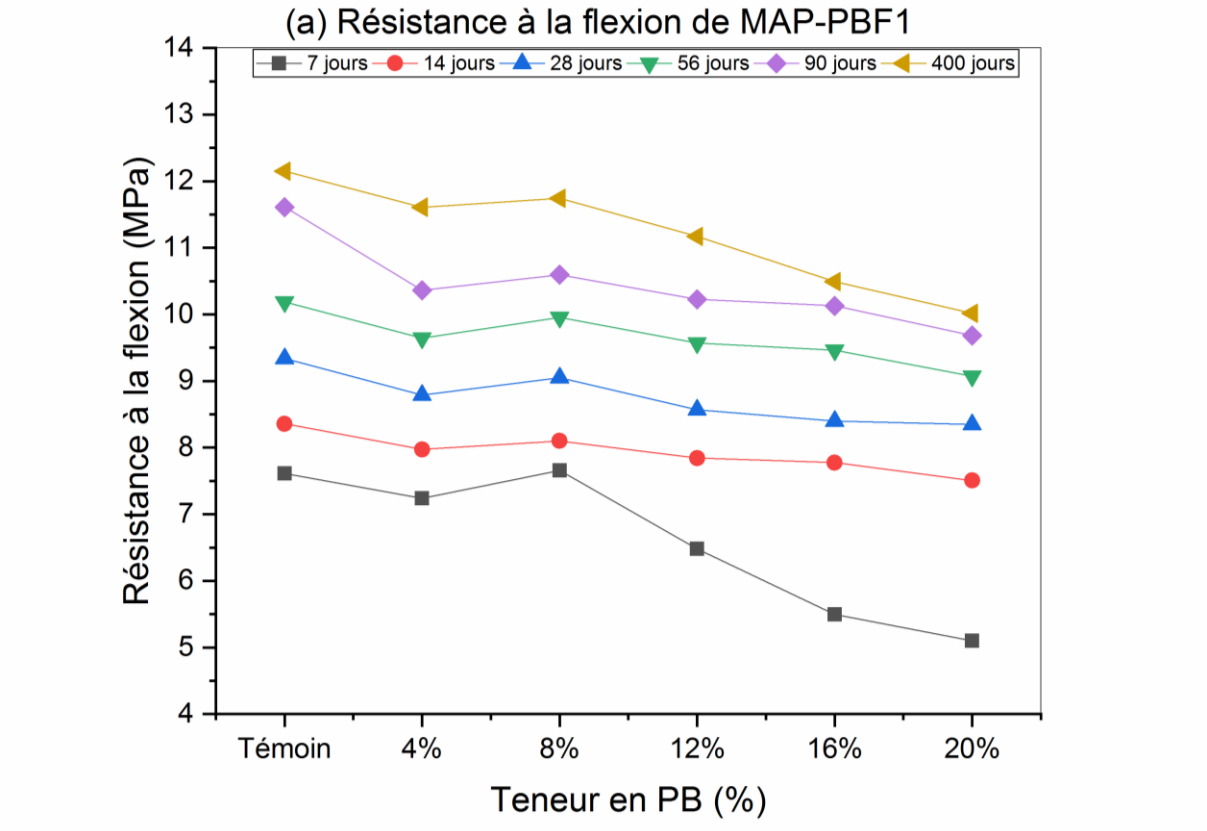


Figure IV.23: Résistance à la flexion des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g).

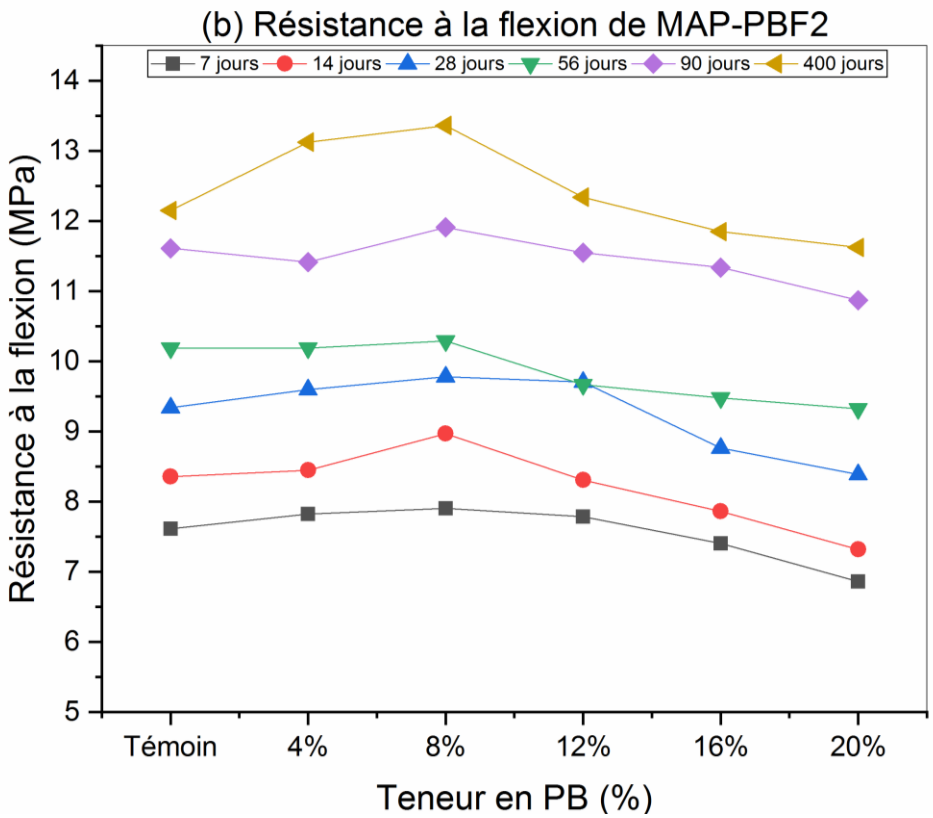


Figure IV.24: Résistance à la flexion des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g).

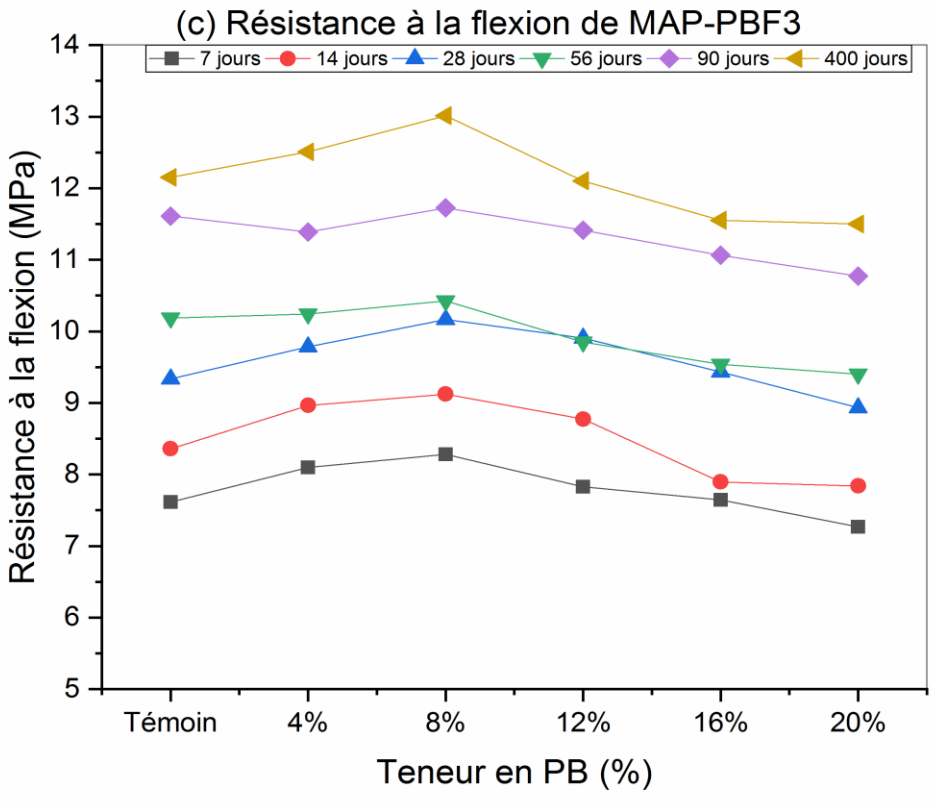


Figure IV.25: Résistance à la flexion des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g).

A partir de ces figures, et comme pour le cas de la résistance à la compression, on remarque que l'augmentation du taux de substitution de PB entraine une baisse de la résistance à la flexion pour tous les MAP-PB étudiés.
Pour les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g), on peut observer une diminution progressive de la résistance à la flexion à jeune âge par rapport au MAP témoin. Une baisse de 5% ; 1% ; 15% ; 28% et 33% à 7 jours, et de 5% ; 3% ; 6% ; 7% et 10% à 14 jours, et de 6% ; 3% ; 8% ; 10% et 11% à 28 jours a été enregistré respectivement avec 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de la poudre de brique. Cependant à partir de 56 jours les résistances deviennent comparables. La diminution de la résistance à la traction par flexion de béton avec de la poudre de brique à jeune âge est confirmée aussi par Silva et al.[261] ou une baisse de 1,50 à 15,29% a été enregistré à 28 jours par rapport au mélange de contrôle. Tandis que, la résistance a augmenté avec le temps et l'incorporation de 25% de PB a développé la résistance la plus élevée à 360 jours.
L'augmentation de la surface spécifique de la poudre de brique, rend les MAP-PB plus actifs au jeune âge. Par conséquent, un gain de 3% ; 4% et 2% à 7 jours et de 1% ; 7% et 1% à 14 jours, et de 4% ;5% et 4% à 28 jours en résistance est observé pour le MAP-PBF2 avec 4%, 8% et 12% de PB par rapport au MAP témoin respectivement. De même, une amélioration de 7% ; 9% et 3% à 7 jours, et de 7% ; 9% et 5% à 14 jours, et de 5% ; 9% et 6% de MAP-PBF3 avec 4%, 8% et 12% de PB respectivement est obtenue, en comparaison au mortier témoin.

D'autre part, l'effet de la finesse est bien observé à partir de 56 jours de cure ou une amélioration de 5% ; 3% et 1% a été notée pour les MAP-PBF2 (4400 cm2/g) et de 6% ; 5% et 3% pour les MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) avec 4%, 8% et 12% de PB comparé au MAP-PBF1 (3300 cm^2/g).
A l'âge de 90 jours la résistance de MAP-PBF2 rattrape ou dépasse celle de MAP-PBF3. La meilleure résistance à la flexion est observée pour le mortier avec 8% de PB avec une valeur d'environ 13 MPa à 400 jours. Pour une finesse de 6000 cm^2/g, la résistance à la flexion augmente d'environ 2 MPa lorsqu'on remplace le ciment par 8% de PB à 400 jours comparé au MAP-8PB avec la finesse de 3300 cm^2/g.
D'après les résultats de Shah et al. [265] sur l'effet de la poudre de brique comme matériaux cimentaires supplémentaires sur la résistance à la flexion, des résistances supérieures au mélange témoin sont révélées pour la substitution du ciment par 10% de PB de 3 à 90 jours. Selon Ge et al.[1], cela peut s'expliquer par la surface rugueuse qui pourrait entraîner une plus grande force d'adhérence entre la BP et la matrice cimentaire. Du même, la plus grande surface spécifique de BP remplit les vides et les pores et rend la microstructure du mortier dense, la réaction pouzzolanique de BP joue également son rôle dans l'augmentation de la résistance. Ce résultat est en accord avec d'autres études expérimentales [121,139].

IV.5.3. Résistance à la flexion des MAP-PB conservés à l'air libre

Pour les compositions contenant de la poudre de brique conservés à l'aire libre, le développement des résistances à la flexion en fonction de la finesse et de taux de substitution est présenté sur les figures IV.26, IV.27 et IV.28.

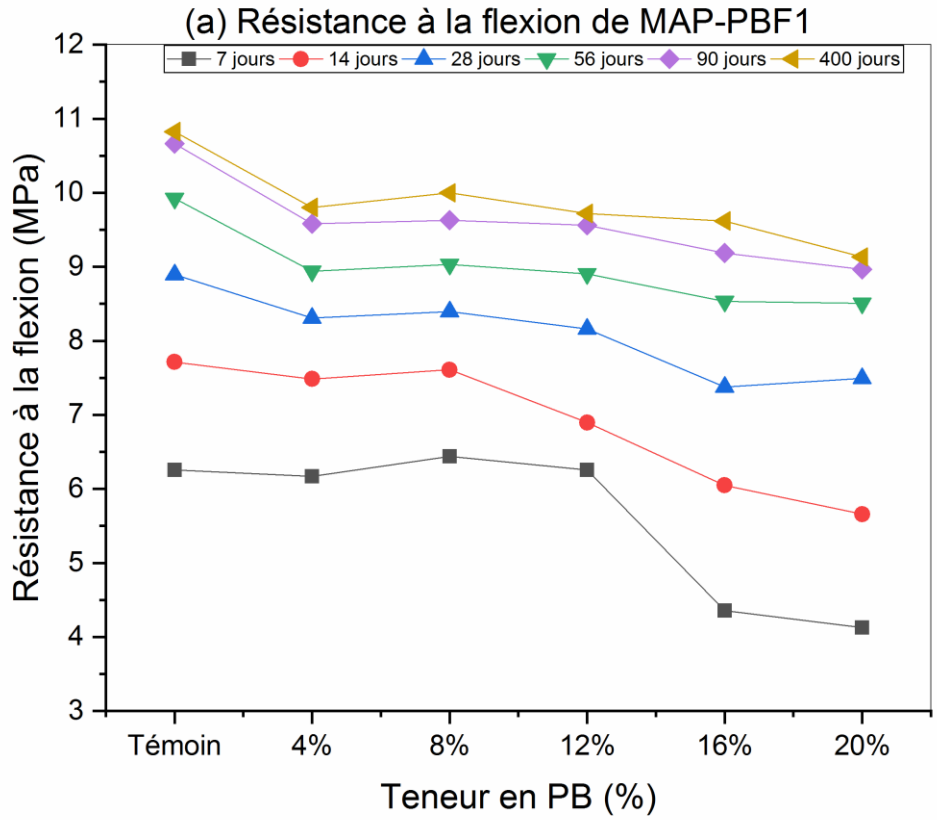


Figure IV.26: Résistance à la flexion des MAP au PB (F1 : 3300 cm^2 /g).

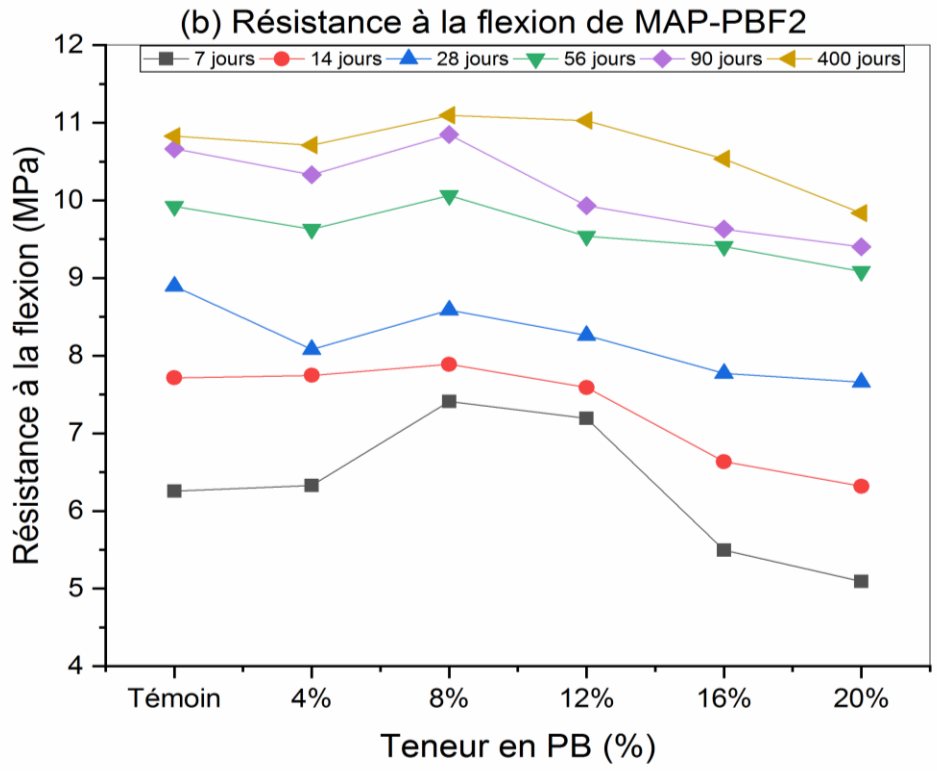


Figure IV.27: Résistance à la flexion des MAP au PB (F2 : 4400 cm^2 /g).

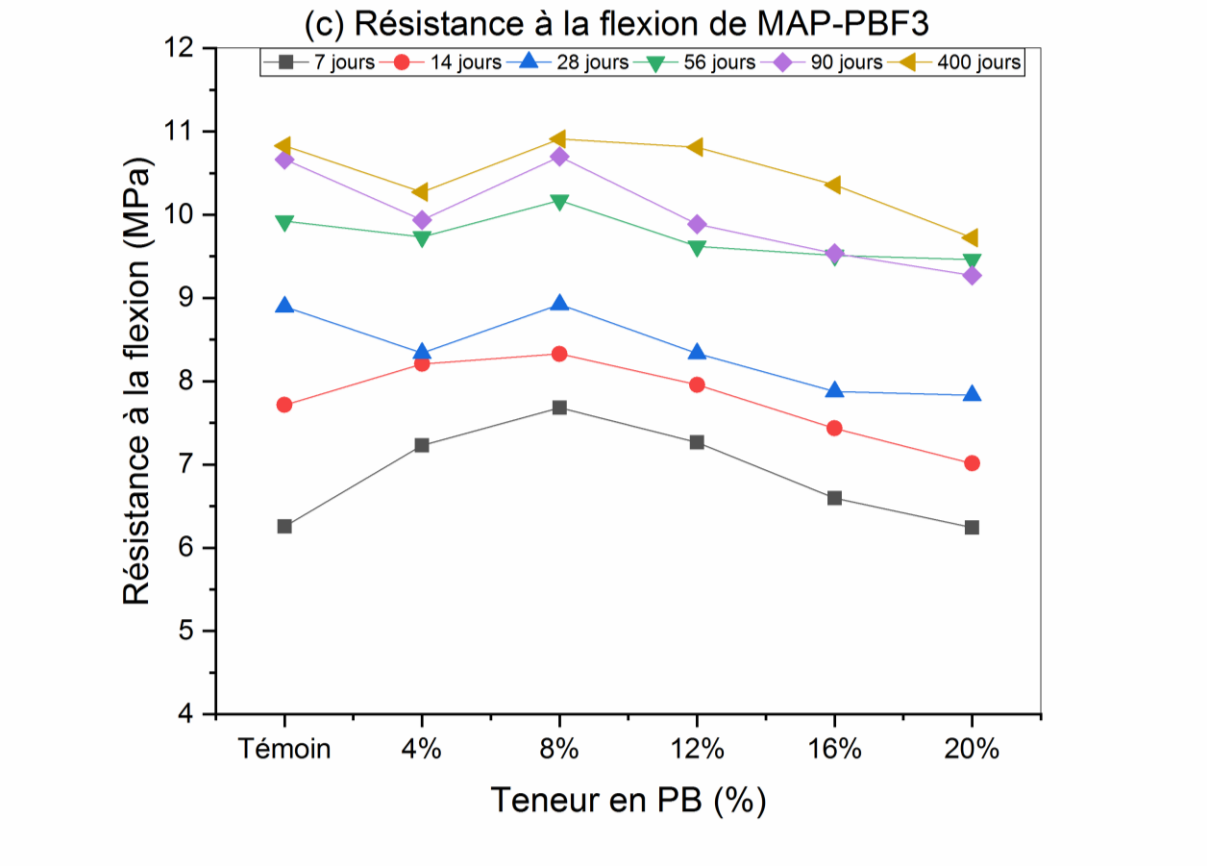


Figure IV.28: Résistance à la flexion des MAP au PB (F3 : 6000 cm^2 /g).

Comme pour le cas des MAP-PB conservés dans l'eau, les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) présentent des résistances inférieures au MAP témoin pour les différents âges de durcissement.

Pour le cas des MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g), on observe qu'ils ont un comportement différent au MAP-PBF1, ou une amélioration de la résistance à la flexion est enregistrée dès les plus jeunes âges. En effet, l'augmentation est respectivement de 2% ; 18% et 15% à 7 jours, et de 1% ; 3 ; à 14 jours pour les MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et de 16% ; 23% et 16% à 7 jours, et de 6% ; 8% et 3% à 14 jours pour les MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) avec 4%, 8% et 12% de PB comparé au MAP témoin. Karats et al.[139] ont confirmé aussi l'amélioration de la résistance à la traction à 7 jours des mortiers avec 10, 15 et 20% de la poudre de brique, et le 5% de PB a présenté la résistance à la traction la plus élevée.

Des résistances comparables à ceux de mortier témoin à partir de 28 jours sont observées pour les MAP-PBF2 et MAP-PBF3.

A long terme, une amélioration remarquable de la résistance à la flexion de MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) par rapport au MAP-PBF1 (3300 cm^2/g). L'amélioration avec 8% de PB est de 11% et 12% à 56 jours, et de 13% et 11% à 90 jours, et de 11% et 9% à 400 jours pour les MAP-PBF2 et MAP-PBF3 respectivement. De plus, le MAP à base de 8% PB avec une finesse de 4400 cm^2/g montre la plus grande résistance à la flexion qui atteint 11 MPa à 400 jours. En outre, l'augmentation de la proportion de la poudre de brique à substituer, au-delà de 12% entraine une diminution de la résistance à la flexion.

D'après les résultats des figures IV.5-IV.28, et l'ensemble des analyses et comparaisons réalisées, on peut constater que les résistances des mortiers conservés dans l'eau sont plus efficaces par rapport à ceux conservés à l'air libre.

IV.6. Influence de la PV et PB sur l'évolution de l'absorption par immersion totale

IV.6.1 Absorption par immersion totale des MAP-PV conservés dans l'eau

Les figures IV.29, IV.30 et IV.31 présentent l'absorption d'eau par immersion totale des MAP au PV avec les trois finesses.

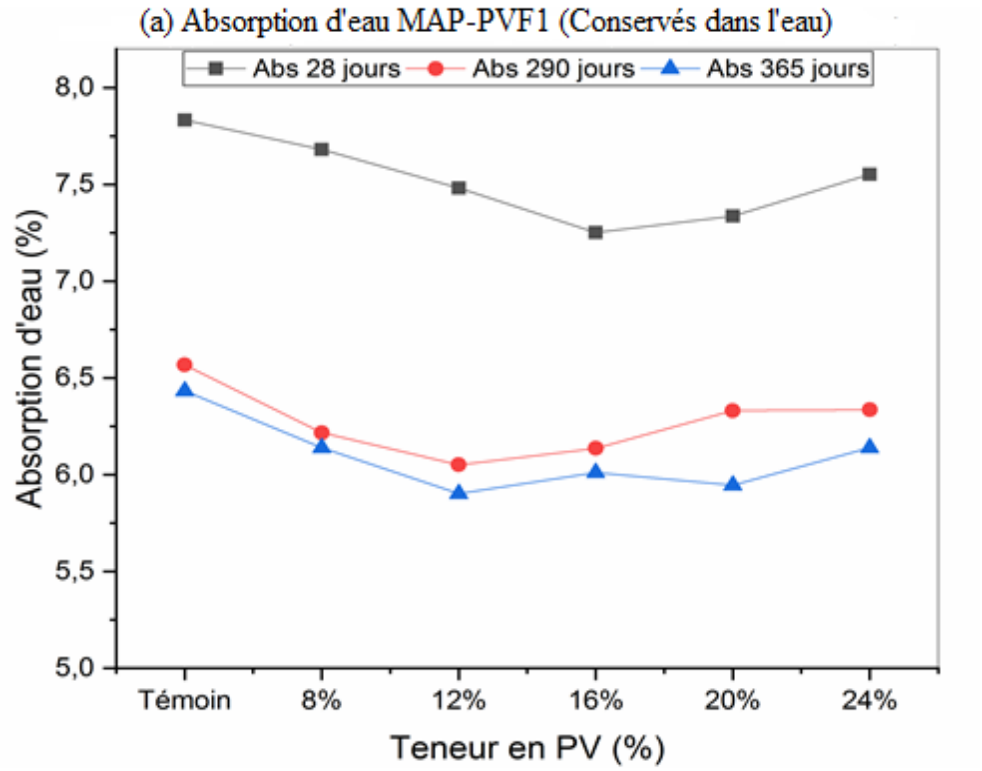


Figure IV.29. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conservés dans l'eau.

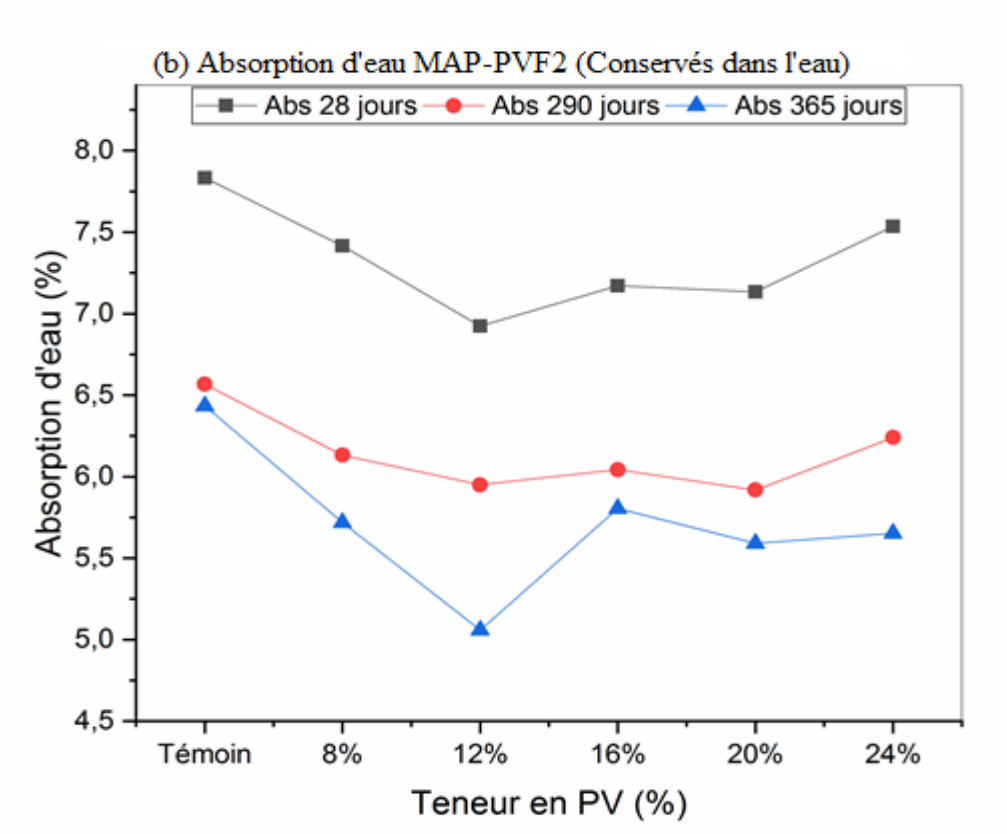


Figure IV.30. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conservés dans l'eau.

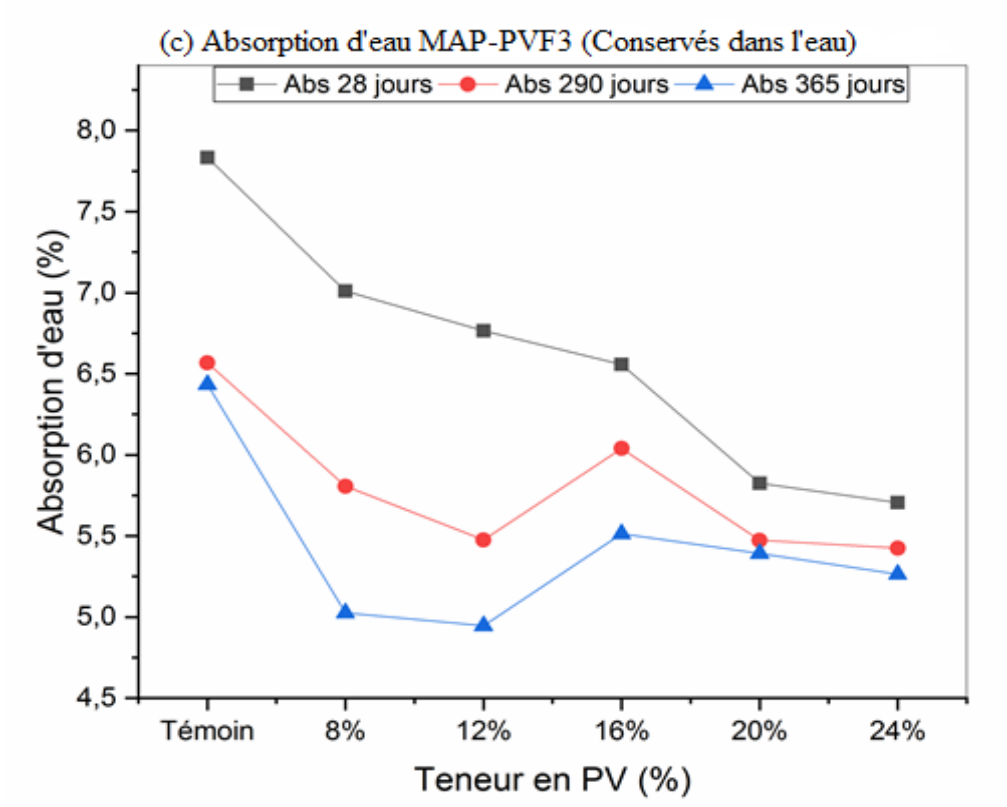


Figure IV.31. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conservés dans l'eau.

Au regard de ces résultats, il est constaté que la présence de la poudre de verre engendre une diminution de l'absorption d'eau avec l'âge. La même observation est notée quel que soit la surface spécifique du PV, plus la finesse augmente plus l'absorption diminue.
Pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g), l'absorption diminue de 2% ; 5% ;7% ; 6% et 4% à 28 jours, et de 5% ; 8% ; 7% ; 4% et 4% à 290 jours et de 5% ; 8% ; 7% ; 8% et 5% à 365 jours pour une teneur en PV de 8%, 12%, 16%, 20% et 24% respectivement. Cette réduction est à cause du remplissage et du raffinement de la structure des pores ; la poudre de verre améliore le tassement des particules ce qui rend la microstructure plus dense et donc moins absorbante.
De plus, il y a eu une réduction significative du taux d'absorption d'eau pour les MAP-PV conservés dans l'eau par rapport au MAP témoin.
Ce résultat est confirmé par une autre recherche réalisé par Mahdi et al. [253], ou l'effet de la poudre de verre sur l'absorption capillaire d'eau du béton autoplaçant a été étudié. Les auteurs ont prouvé que l'incorporation du PV est remarquablement efficace du point de vu absorption capillaire de BAP, en particulier les compositions avec 30% de PV. En effet, ces dernières ont subi une diminution d'absorption de 46,77% par rapport au BAP témoin. La même observation a été faite par Liaqat et al. [266] où la présence du PV s'est avérée être bénéfique pour le béton. En effet des valeurs d'absorption inférieures ont été notées pour les mélanges au PV.

Les plus faibles valeurs d'absorption sont enregistrées pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) par rapport au MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) à 365 jours.
Une réduction de 7% ; 14% ; 4% ; 6% et 8% pour les MAP-PVF2 et de 19% ; 16% ; 8% ; 9% et 14% pour les MAP-PVF3 pour des taux d'incorporation de 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de PV comparé au MAP-PVF1 à 365 jours. Patel et al. [80] ont étudié l'effet de la taille de la poudre de verre sur l'absorption d'eau, et ont trouvé les mêmes résultats qui ont montré une réduction de 30% de l'absorption pour le PV75 (verre dépoli passant 100 % à travers un tamis de 75 µm) et de 34% pour le PV63 (verre dépoli passant à 100 % à travers un tamis de 63 µm) au niveau de remplacement 20% de PV par rapport au mélange témoin.
Ce comportement a été attribué à l'affinement de la structure poreuse du mortier par l'effet pouzzolanique du verre en poudre qui rend le mortier plus dense et par conséquent moins absorbant [267].

IV.6.2 Absorption par immersion totale des MAP-PV conservés à l'air libre

Les résultats de l'absorption d'eau des mélanges MAP-PV avec trois finesses différentes conservées à l'air libre à 28, 290 et 365 jours de durcissement sont fournis sur les figures IV.32, IV.33 et IV.34.

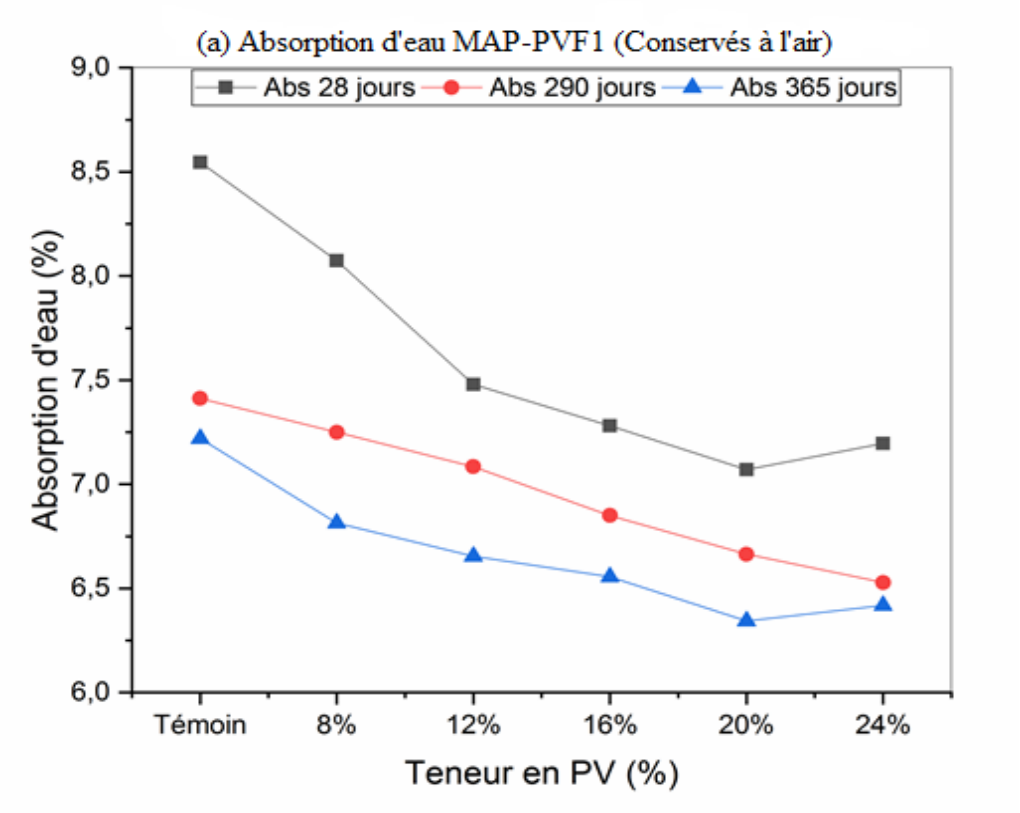


Figure IV.32. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conservés à l'air libre.

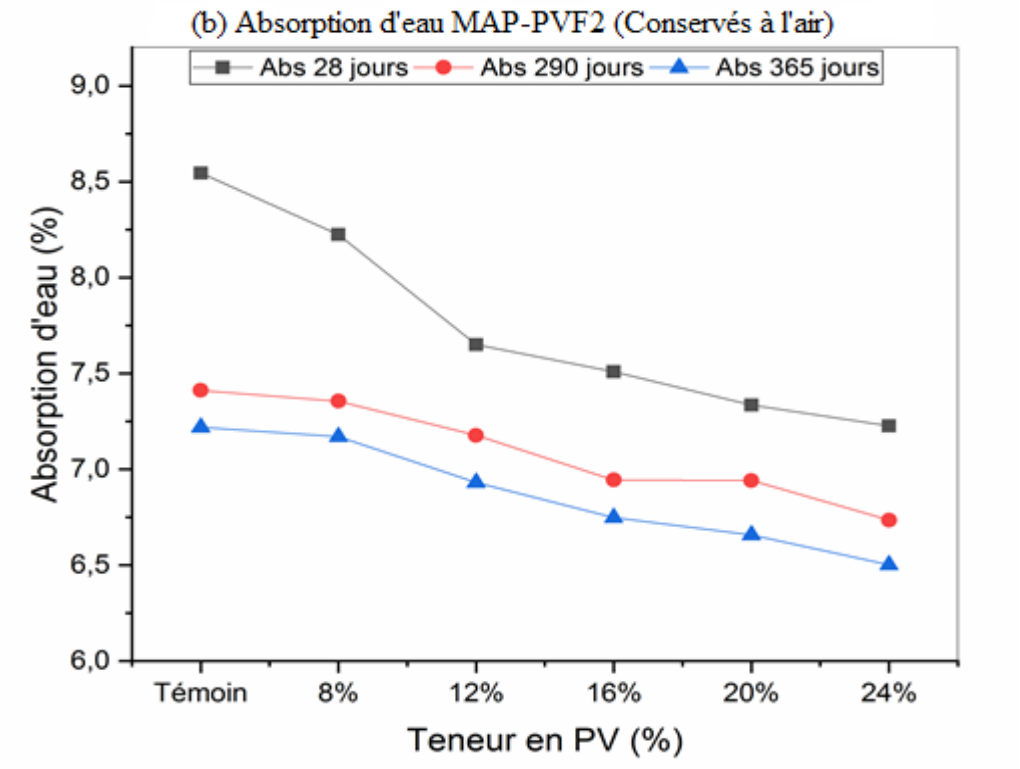


Figure IV.33. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conservés à l'air libre.

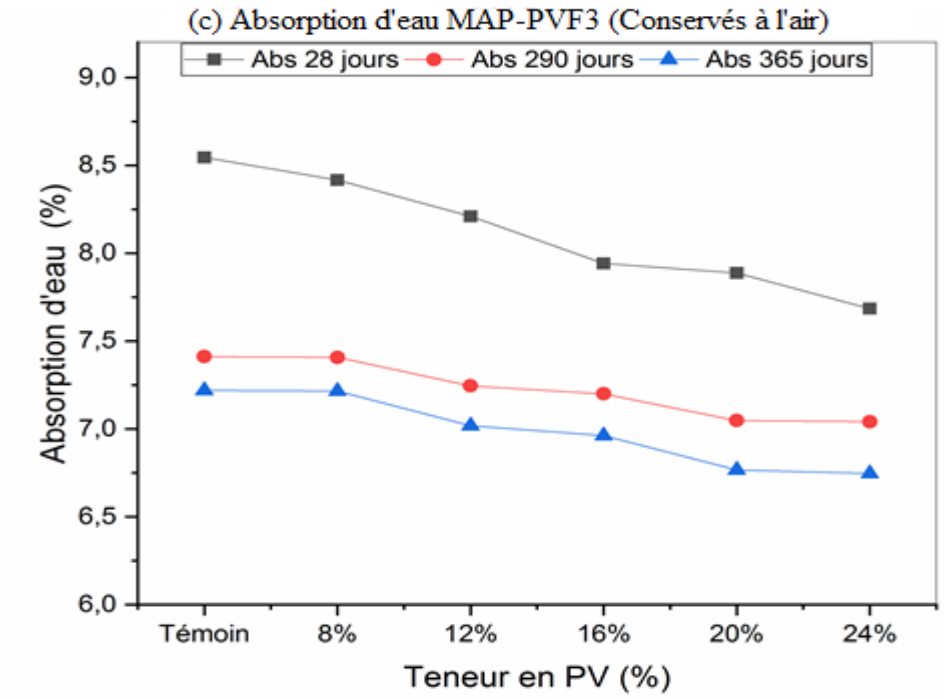


Figure IV.34. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conservés à l'air libre.

Les résultats montrent une diminution de l'absorption avec l'âge et ceci pour tous les mélanges. on observe aussi que la quantité d'eau absorbée diminue avec l'augmentation de la quantité de PV substitué. Cette tendance est due à la propriété imperméable du PV comme matériau à très faible valeur d'absorption d'eau, par conséquent, la présence de PV dans le mortier réduit la demande totale en absorption d'eau [268].

Au contraire, plus on augmente la finesse plus l'absorption devient plus élevée est ceci pour les mélanges MAP-PV conservés à l'air libre, néanmoins l'absorption reste inférieure à celle du MAP témoin.

Les valeurs les plus faibles d'absorption d'eau sont enregistrées pour les mélanges de MAP-PVF1 (3300 cm^2/g), la réduction par rapport au mélange de contrôle à 365 jours est de 6% ; 8% ; 10% ; 11% et 12% pour des taux d'incorporation de 8%, 12%, 16%,20% et 24% de PV respectivement.

Pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) une réduction de 1% ; 4% ; 7% ; 8% et 10% et de 1% ; 3% ; 4% ; 6% et 7% pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) à 365 jours pour les 8%, 12%, 16% , 20% et 24% de PV respectivement.

Hossam et al. [252] ont confirmé que l'absorption d'eau de béton contenant de la poudre de verre diminue en fonction de l'âge et du taux d'incorporation de PV. Ibrahim et al. [250] ont également montré que le taux d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de pourcentage de remplacement de la poudre de verre, des réductions de 5,56 % ; 11,11 % ; 20,37 % et 27,78 % pour des taux d'incorporation de 5%, 10%, 15% et 20% de PV par rapport au béton témoin. De même Balasubramanian et al. [269] ont trouvé une réduction de l'absorption d'eau qui se situait entre 4,3% à 48% pour des taux de substitution de 5%, 10%, 15% et 20% de PV par rapport au béton témoin.

Ce phénomène pourrait être attribué la présence de particule de PV qui peuvent jouer le rôle de charge dans le mortier, et rendre ainsi les pores et l'éprouvette de mortier imperméables, entraînant une réduction du taux d'absorption d'eau [270].

Le durcissement de 7 à 365 jours entraîne aussi une diminution de l'absorption car avec le temps, des hydrates sont produits et donc, plus le temps de durcissement est long, plus le béton devient dense.

IV.6.3. Absorption par immersion totale des MAP-PB conservés dans l'eau

L'influence du taux d'incorporation et de la finesse de la poudre de brique sur l'évolution de l'absorption d'eau par immersion totale en fonction de l'âge des MAP-PB retenues dans l'eau est représentée sur les figures IV.35, IV.36 et IV.37 pour une substitution de 4% ; 8% ; 12% ; 16% et 20% respectivement.

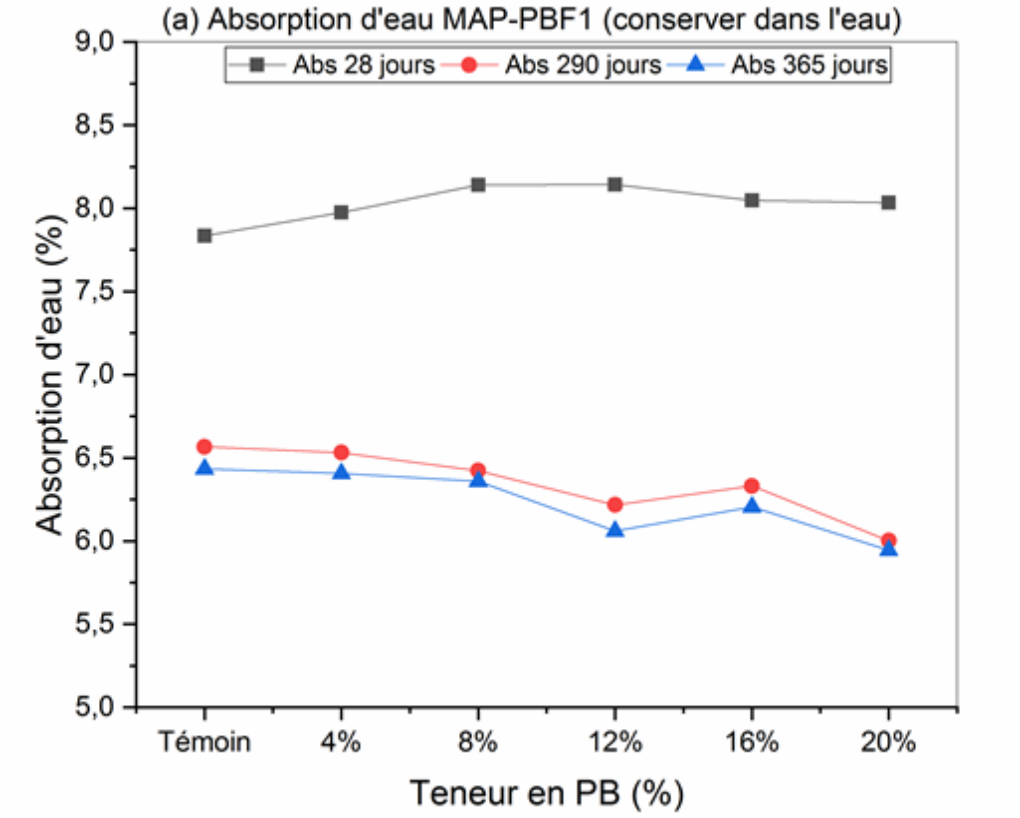


Figure IV.35. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conservés dans l'eau.

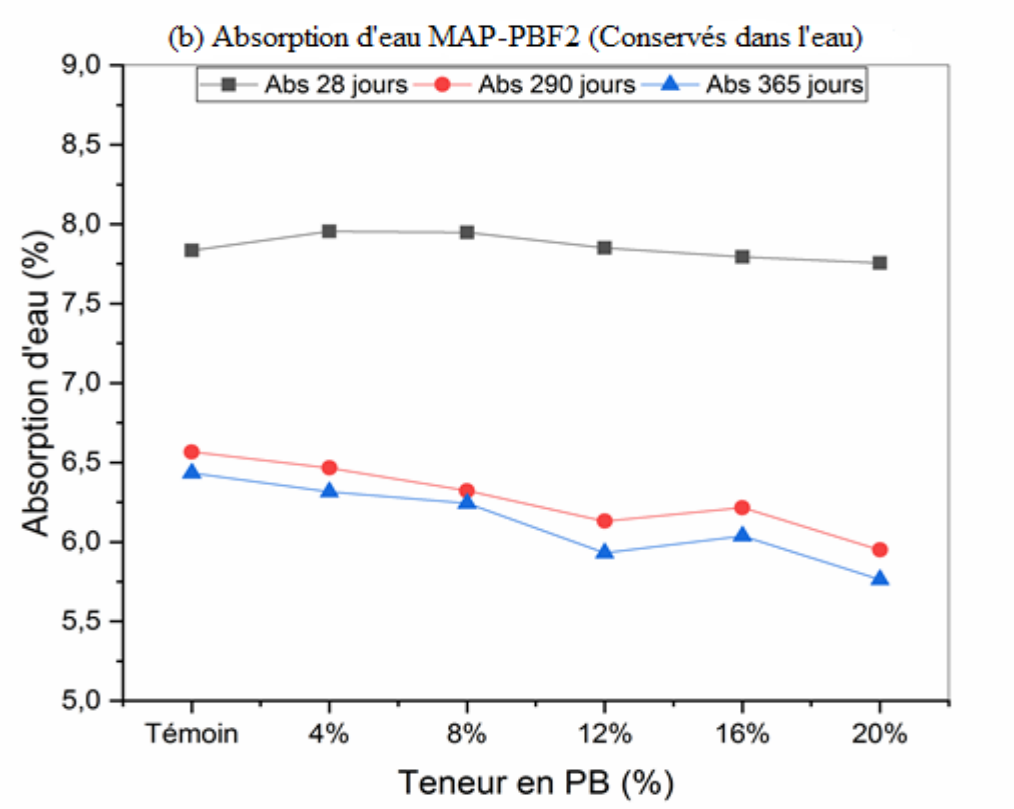


Figure IV.36. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conservés dans l'eau.

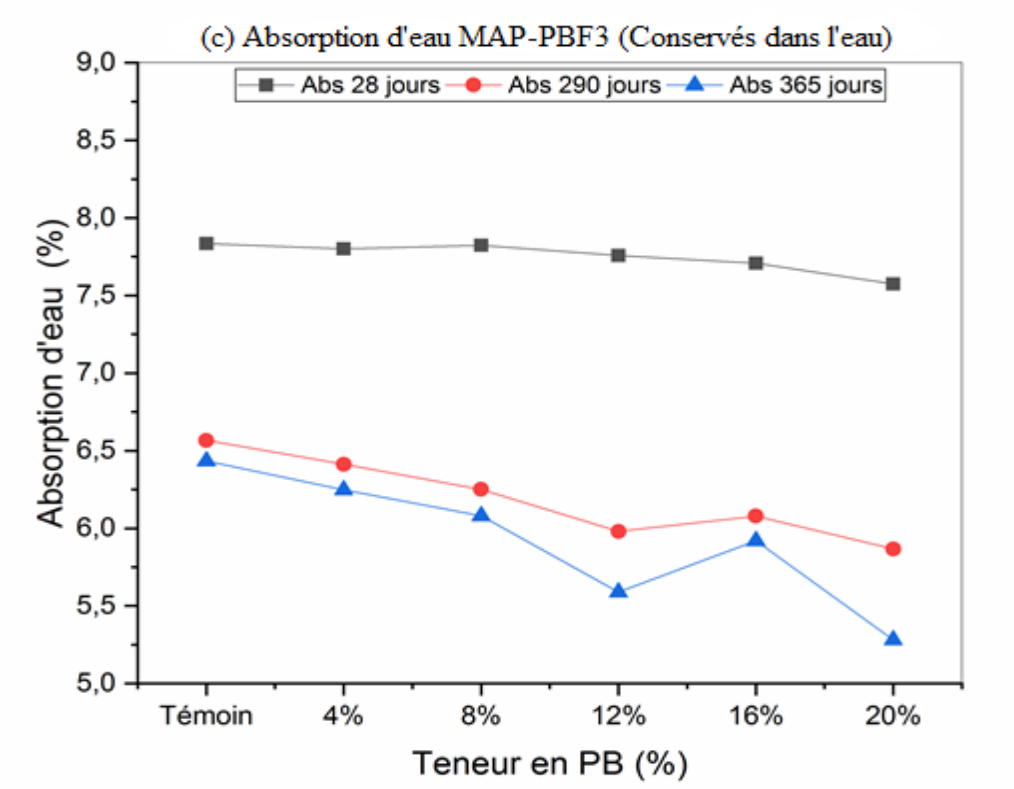


Figure IV.37. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conservés dans l'eau.

Les résultats montrent que l'augmentation de la finesse de la PB entraîne une diminution de l'absorption d'eau. Cette diminution d'absorption est plus visible avec l'âge, ou à 290 jours et 365 jours la diminution est importante. Les résultats sont conformes à ceux trouvés par Zhiming et al. [255] En effet, les auteurs ont constaté que l'absorption d'eau des mortiers diminue avec l'augmentation de la surface spécifique de poudre de brique.

Le MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) a montré une augmentation de taux d'absorption à 28 jours et elle dépasse la valeur correspondante pour le MAP témoin, mais l'absorption commence à diminuer avec l'augmentation de la finesse, la diminution se poursuit entre 290 et 365 jours pour les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g), alors que pour MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) la diminution de l'absorption est remarquable de 28 à 365 jours. Des résultats comparables sont obtenus par des recherches menées par Silva et al. [261] où l'effet de la poudre de brique sur l'absorption d'eau de béton a été étudié. Il s'est avéré que l'absorption d'eau des mélanges avec de la poudre de brique a augmenté jusqu'à 28 jours par rapport au mélange témoin. Cependant, à des âges plus avancés, avec la progression de la maturation, l'absorption d'eau a diminué en raison du processus d'hydratation. En outre, Shah et al. [265] ont révélé que l'incorporation de la PB dans les pâtes auto-compactants réduisait l'absorption d'eau en concluant que les mélanges avec PB sont moins poreux et plus durables que les mélanges sans PB.
La valeur de l'absorption diminue du fait que la poudre de brique à surface spécifique élevée avait un effet bénéfique grâce à la réactivité pouzzolanique qui forme des gels secondaires de CSH [271]. Ces derniers aident à raffiner les pores du mortier en formant une barrière pour empêcher l'absorption d'eau.

A 365 jours, les valeurs d'absorption sont inférieures pour les trois mélanges MAP–PB que ceux observés au MAP de contrôle en raison de la structure raffinée des pores, et le MAP avec 20% PB avait la plus faible absorption d'eau, soit 8%, 10% et 18% moins que le mortier de référence pour les MAP-PBF1, MAP-PBF2 et MAP-PBF3 respectivement.

IV.6.4. Absorption par immersion totale des MAP-PB conservés à l'air libre

En analysant l'évolution des courbes de l'absorption d'eau par immersion totale des MAP-PB retenus à l'air libre présentées sur les figures IV.38, IV.39 et IV.40, nous pouvons constater une augmentation des valeurs d'absorption avec l'augmentation de niveau de remplacement et de la finesse des particules de PB et diminue avec le temps de durcissement de 28 à 365 jours. L'absorption des MAP-PB avec les trois finesses à 28 jours est la plus élevée. Une finesse accrue conduit à une forte absorption d'eau de la poudre de brique.

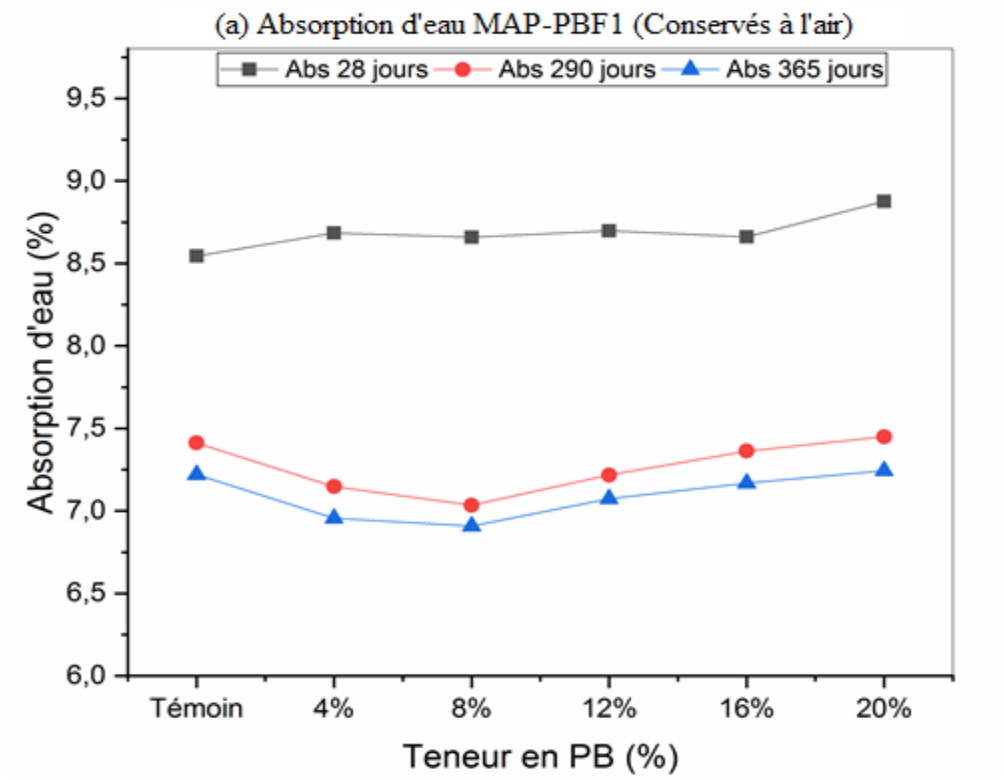


Figure IV.38. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) conservés à l'air libre.

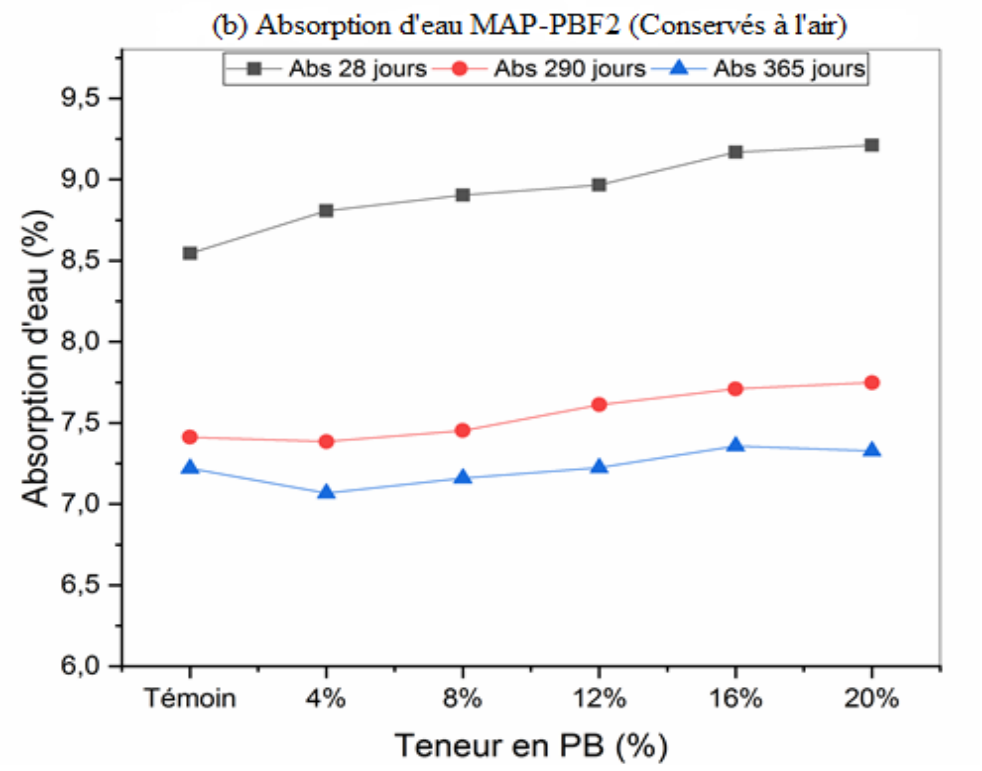


Figure IV.39. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) conservés à l'air libre.

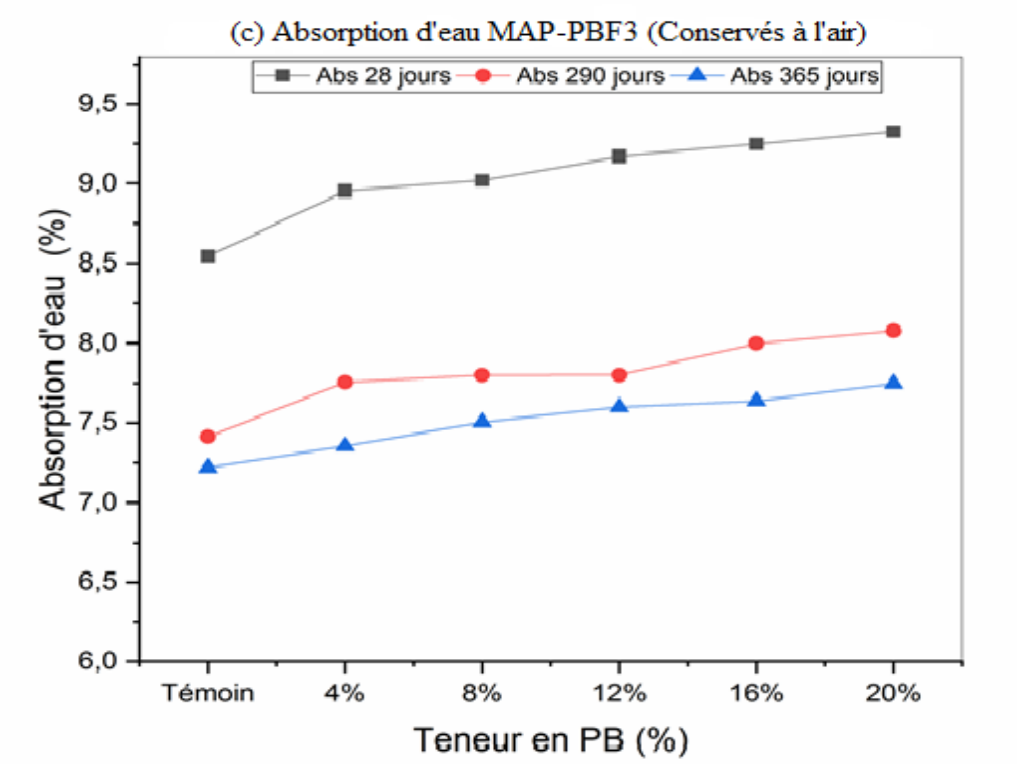


Figure IV.40. Évolution de l'absorption pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) conservés à l'air libre.

Le mélange avec 20% PB a présenté l'absorption d'eau la plus élevée pour les trois mélanges MAP-PBF1 (3300 cm^2/g), MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g), l'augmentation est de 4%, 8% et 9% par rapport au MAP témoin à 28 jours. De plus, l'absorption accrue de l'eau a été observé lorsqu'un taux de remplacement plus élevé de la PB a été utilisé. Des résultats similaires sont observés par Li et al. [112] où ils ont constaté une légère augmentation de l'absorption d'eau après l'utilisation de la poudre de brique dans les enduits décoratifs. Du même Amjadi et al.[272] ont indiqué que l'absorption d'eau du MAP augmente après le remplacement du ciment par 5 à 15 % de PB. Si-Ahmed et Kenai [257] ont également trouvé que les MAP contentent de la poudre de brique, sont plus absorbants que le MAP sans PB.

L'absorption d'eau élevée de la poussière de brique pourrait contribuer à l'apparition d'effet de durcissement interne [1].

Pour les MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) à 290 jours, l'absorption augmente de 3% ; 6% ; 6% ; 5% et 4% ,et de 9% ; 11% ; 8% ; 9% et 8% respectivement pour une teneur en PB de 4%, 8%, 12%, 16% et 20% par rapport au MAP-PBF1 (3300 cm^2/g).

Il est remarqué aussi qu'à 365 jours, les MAP-PBF1 et MAP-PBF2 avec 4%, 8% et 12% de PB présentent des valeurs d'absorption inférieures à celles du mortier témoin. Tandis que, l'absorption des MAP-PBF3 reste toujours supérieure aux valeurs enregistrées pour les MAP témoin. Les données de la littérature montrent des avis contradictoires sur l'effet de cette addition sur le comportement des bétons et mortiers vis-à-vis de l'absorption d'eau, où plusieurs recherches [271] rapportent l'effet positif de la substitution du ciment par la poudre de brique.

IV.7. Influence de la PV et PB sur la porosité

IV.7.1. Porosité des MAP-PV conservés dans l'eau

La porosité est un indicateur important de la durabilité des mortiers et bétons. Les résultats de la porosité accessible à l'eau des mélanges MAP-PV conservés dans l'eau à 28 et 400 jours sont présentés dans les figures IV.41 etIV.42.

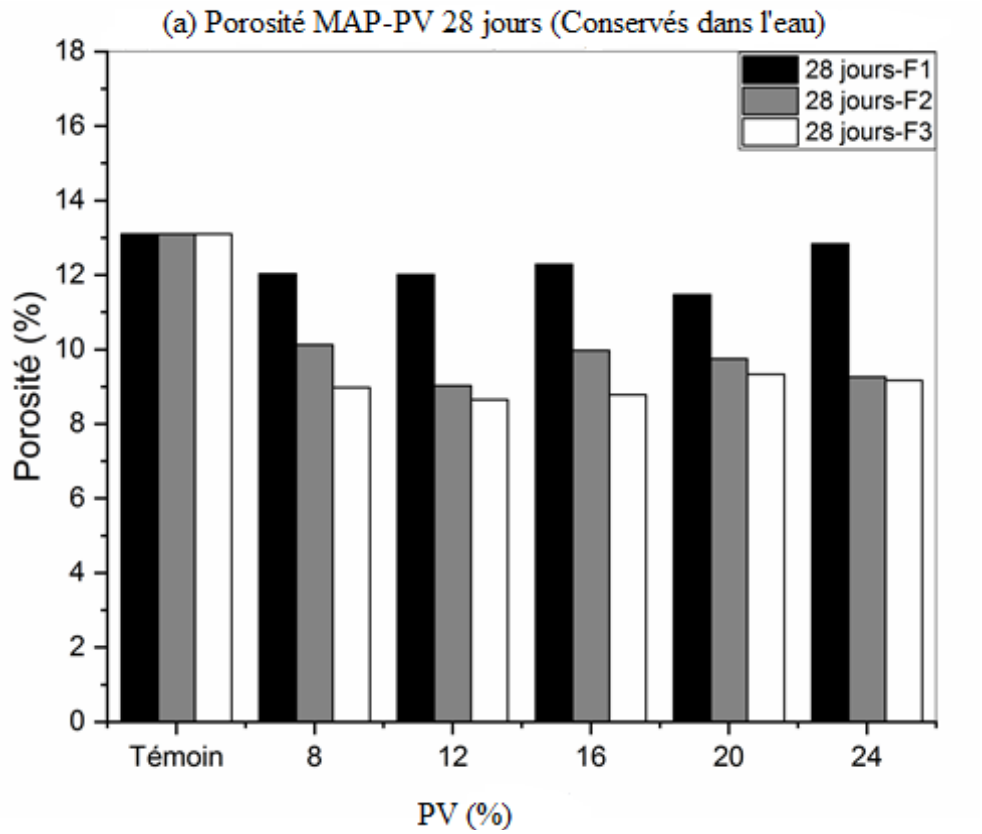


Figure IV.41: Porosité des MAP-PV conservés dans l'eau à 28 jours.

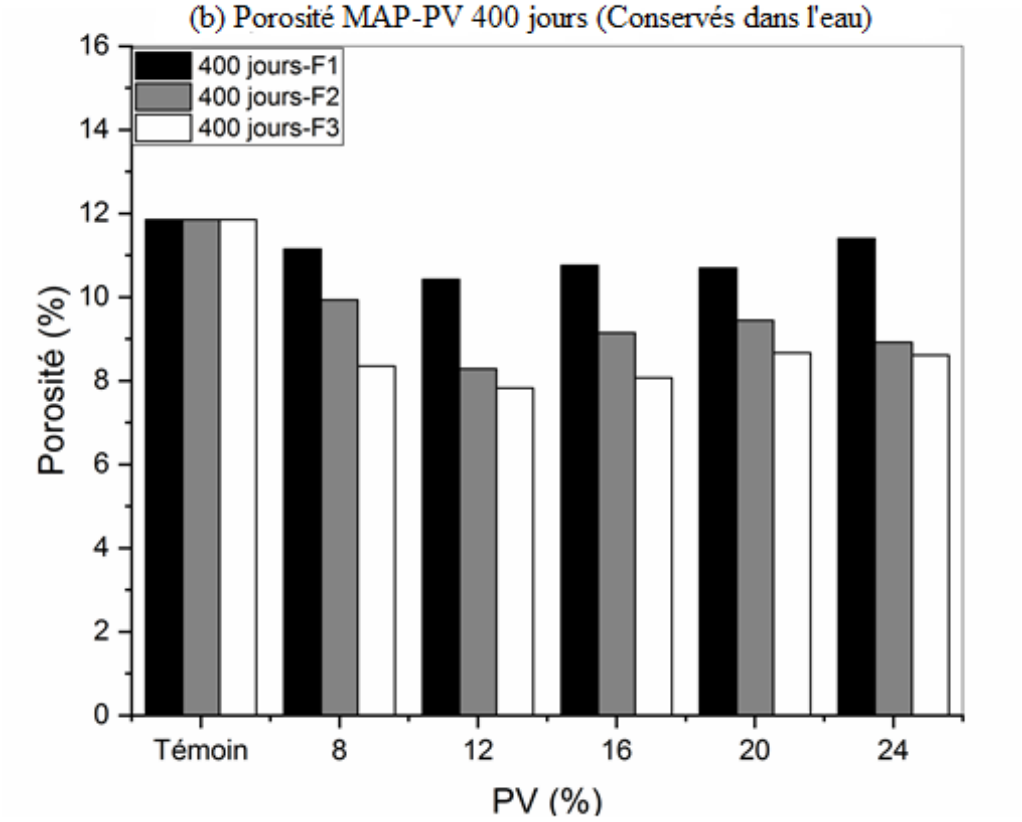


Figure IV.42: Porosité des MAP-PV conservés dans l'eau à 400 jours.

On peut observer que la poudre de verre a une influence positive sur la réduction de la porosité totale. L'augmentation de la finesse provoque une diminution de la porosité des MAP-PV et ceci quel que soit le taux de substitution. En effet, la diminution de la porosité des MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) à 400 jours par rapport au MAP témoin est de 30% ; 34% ;32% ; 27% et 28% pour des taux d'incorporation de 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de PV respectivement. Alors, ces MAP présentent, les mortiers les moins poreux comparativement aux autres mortiers et cela à 28 jours et 400 jours.
On peut également constater que la diminution de la porosité est beaucoup plus prononcée à 400 jours qu'a 28 jours. A titre d'exemple, pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) avec 0%, 8%,12%, 16%, 20% et 24% de PV, la diminution de la porosité est de 10% ; 8% ; 13% ; 12% ;7% et 11% par rapport aux mêmes MAP à 400 jours.

On peut observer également que l'incorporation de 12% et 16% de la poudre de verre pour remplacer le ciment dans les mortiers réduit la porosité totale des MAP, et le mélange contenant 12% de PV est le mélange le moins poreux. En revanche, pour 24% PV on remarque une légère augmentation de la porosité totale surtout avec MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) cela est dû à la création de vides à l'intérieur du mortier mais la porosité reste toujours inférieure à celle du MAP témoin.

Concernant les mélanges durcis dans l'eau, la réduction est de 12%, 30% et 34% pour les MAP-PVF1 (3300 cm2/g), MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) respectivement. Cette diminution de la porosité est due à la grande surface spécifique de la poudre de verre, qui comble les vides et améliore la densité des enrobés des mortiers.

L'effet de la poudre de verre sur la porosité des bétons a été aussi étudié par Zhi-hai [273] et al. Ces auteurs ont montré que l'incorporation de 10% et 20% de la poudre de verre comme substitution du ciment dans le béton fait réduire la porosité totale de béton et le mélange avec 20% de PV et le mélange le moins poreux .Tandis que le mélange avec 30% de PV augmente la porosité totale de béton. En outre Lu et al. [274] ont rapporté que l'absorption négligeable de la poudre de verre, engendre une utilisation d'un rapport E/P faible, ce qui a entrainé une structure plus dense et une porosité plus faible.

IV.7.2. Porosité des MAP-PV conservés à l'air libre

Les valeurs de la porosité accessible à l'eau en fonction de taux d'incorporation de la poudre de verre, de la finesse et de l'âge de durcissement à 28 et 400 jours pour des échantillons conservés à l'air libre sont présentées sur les figures IV.43 et IV.44.

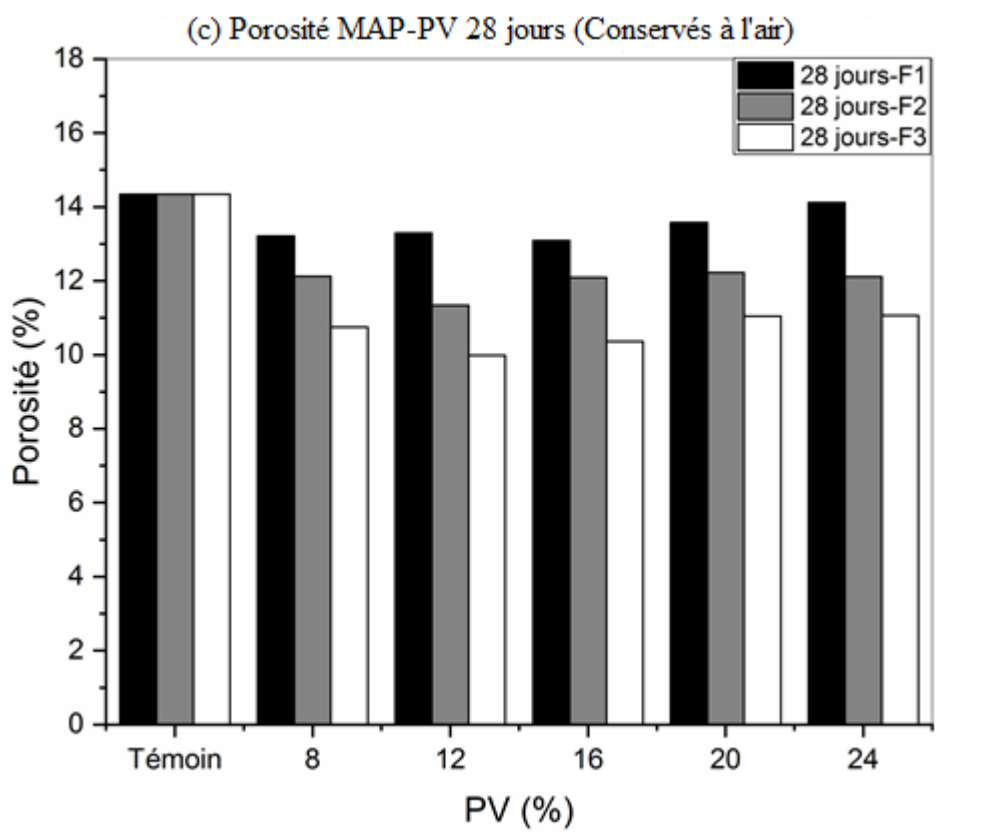


Figure IV.43: Porosité des MAP-PV conservés à l'air libre à 28 jours.

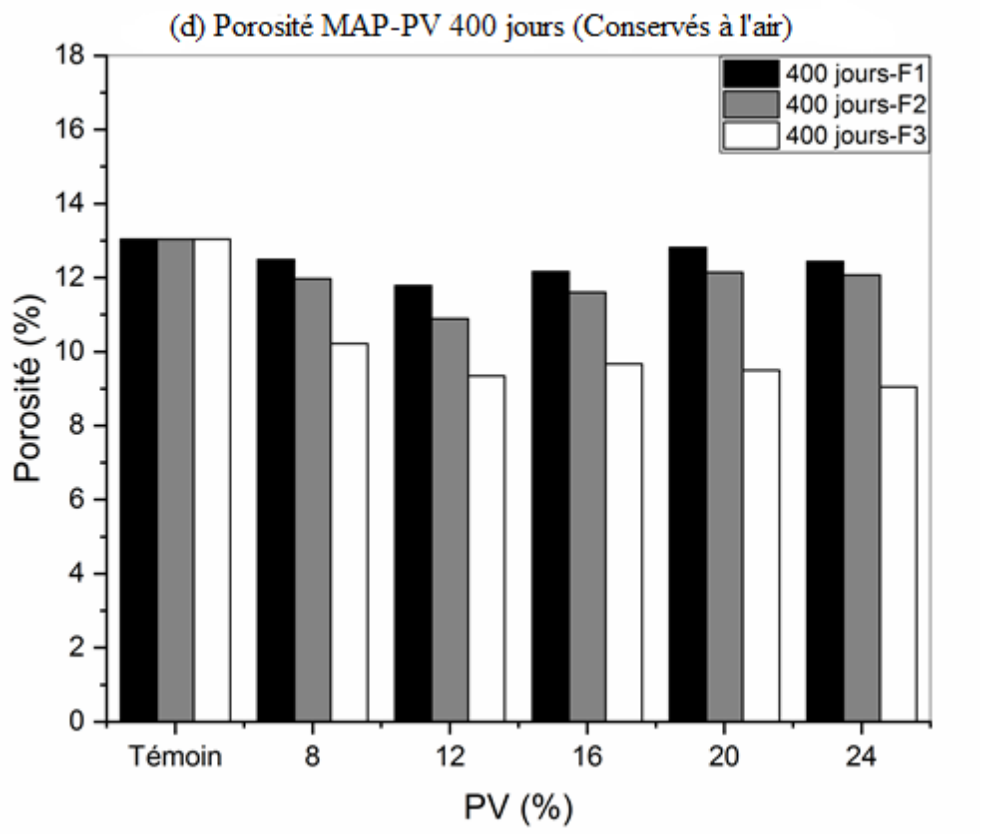


Figure IV.44: Porosité des MAP-PV conservés à l'air libre à 400 jours.

Les résultats présentés sur ces figures montrent l'effet important de la poudre de verre sur la porosité des MAP. En effet, la poudre de verre par son activité pouzzolanique rend les MAP moins poreux. Par conséquent, des réductions de la porosité ont été observées avec l'augmentation de la finesse, comme pour les MAP conservés dans l'eau. Des réductions de 22% ; 28% ; 26% ; 27% et 31% à 400 jours pour les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) avec 8%, 12%, 16%, 20% et 24% PV comparé au MAP témoin.

La porosité et la taille des pores diminuent considérablement avec l'âge de durcissement de 28 à 400 jours, où, une réduction de 9% ; 6% ; 11% ; 7% ; 6% et 12% et de 9% ; 2% ; 4% ; 4% ; 1% et 1% et de 9% ; 5% ; 6% ; 7% ; 14% et 18% pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g), MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) respectivement par rapport aux mêmes MAP à 400 jours.
Pour tous les MAP étudiés, les plus faibles porosités sont observées sur les MAP-PVF3 (6000 cm^2/g). Cela pourrait expliquer pourquoi les propriétés mécaniques des MAP-PV ont augmenté avec l'augmentation de finesse.
Le 12% PV présente le mélange le moins poreux soit à 28 ou à 400 jours. Ce qui confirme les résultats de la résistance à la compression, et qui peut être dû à la production d'autres hydrates (CSH) qui comblent les vides et améliorent la microstructure. Du même, Nassar et al.[76] ont constaté que la réduction de la porosité peut également améliorer la résistance à la compression et à la flexion à long terme.

La réduction de la porosité par rapport au MAP témoin à 400 jours pour les mélanges durcis à l'air libre est de 10%, 17% et 31% pour les MAP-PVF1 (3300 cm^2/g), MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) respectivement. On peut remarquer aussi que les mélanges conservés dans l'eau sont moins poreux que ceux conservés à l'air libre à 28 et à 400 jours.

IV.7.3. Porosité des MAP-PB conservés dans l'eau

Les figures IV.45 et IV.46 représentent l'influence du taux de substitution et de la finesse de PB sur la porosité accessible à l'eau des MAP à 28 et 400 jours respectivement. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau.

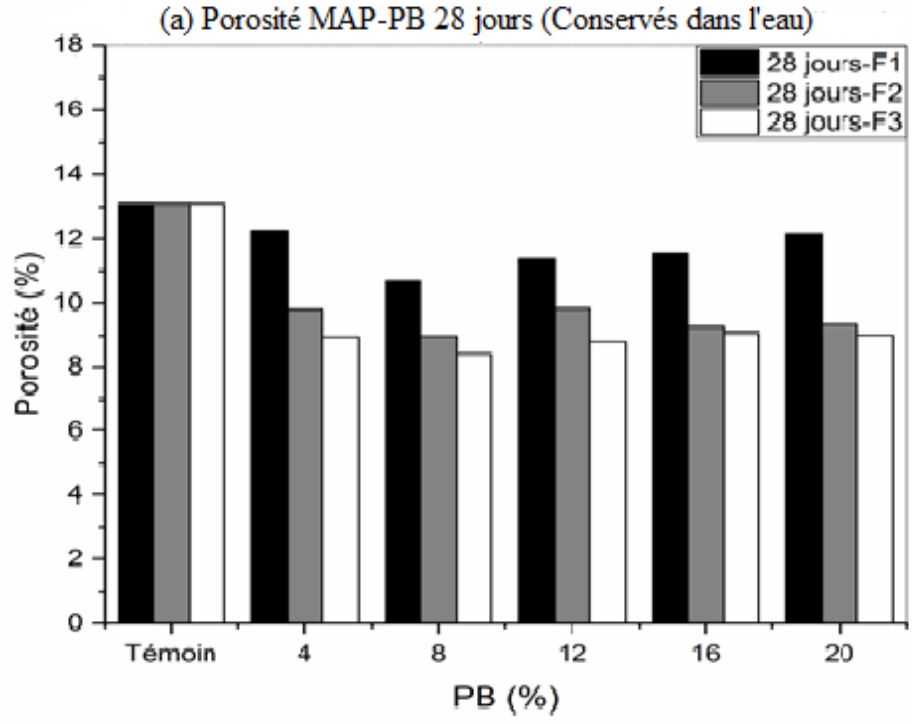


Figure IV.45: Porosité des MAP-PB conservés dans l'eau à 28 jours.

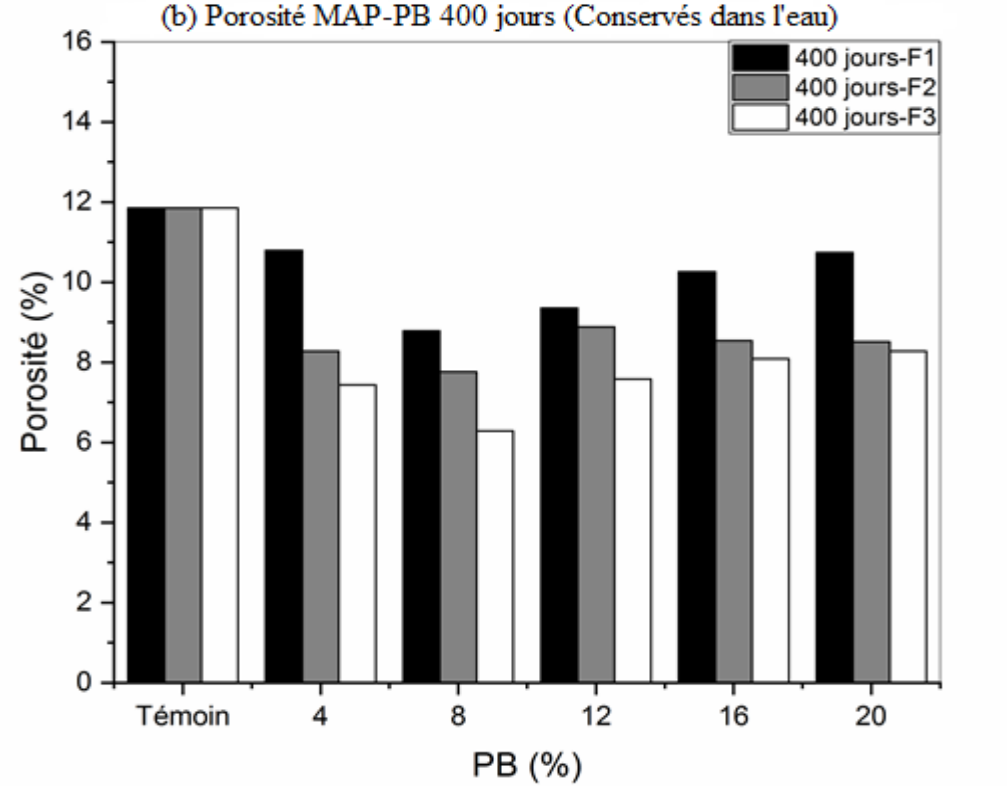


Figure IV.46: Porosité des MAP-PB conservés dans l'eau à 400 jours.

Ces résultats montrent une diminution de la porosité quel que soit le taux de substitution de ciment. La diminution de la porosité est également affectée par l'âge et par la finesse.
L'élévation de la finesse entraine une diminution de la porosité des MAP. Une réduction d'environ 23% ; 12% ; 5% ; 17% et 21% et de 31% ; 28% ; 19% ; 21% et 23% est notée pour les mélanges de MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) avec 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de PB par rapport au MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) à 400 jours respectivement.

Les valeurs de porosité accessible à l'eau pour les mélanges MAP-PB sont toujours inférieures à celles du MAP témoin. A titre d'exemple, une diminution de 6% ; 19% ; 13% ; 12% et 8% pour les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) avec 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de PB comparativement au mortier témoin.
En outre, La porosité a diminué de 28 à 400 jours pour tous les MAP-PB étudiés, principalement à 28 jours et pour les MAP-PBF1 (3300 cm^2/g) la porosité reste pratiquement constante ou légèrement diminuée selon le pourcentage de substitution de PB, pour les MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) la réduction était significative par rapport au MAP témoin.

A 400 jours, le taux de raffinement des pores augmente, entraînant la diminution de la porosité et l'augmentation de la densité. Le mélange avec 8% PBF3 présente le mélange le moins poreux et la réduction atteint 47%.

La distribution granulométrique de la poudre de brique est différente de celle de ciment à cause de sa finesse différente qui peut combler les lacunes entre les particules de ciment ce qui rend la microstructure de la pâte de ciment plus compacte.
Selon la littérature, l'ajout de la poudre de brique affecte de manière significative la porosité de béton. D'après Ortega et al. [129], la porosité a diminué de 28 à 200 jours pour les mortiers avec 10% et 20% de la poudre de brique, principalement entre 28 et 100 jours, et depuis 200 jours, elle est restée pratiquement constante. D'autre part, Toledo et al. [134] ont rapporté que l'addition de 10% de la poudre de brique, engendre une réduction de 2% dans la porosité, tandis que l'ajout de 40% de PB a montré une augmentation de 4% dans la porosité par rapport au mortier témoin (100% ciment). En outre, Schackow et al. [118] ont montré que les valeurs de la porosité des mortiers contenant de la poudre de brique à 90 jours sont restées toujours inférieures à ceux du mortier sans PB. D'après ces auteurs, l'amélioration de la densité des mortiers est due à l'addition de la poudre de brique, les particules fines de la PB peuvent combler l'espace laissé par d'autres composants, réduisant ainsi le volume des pores dans la matrice durcie, Ensuite la réaction a lieu entre les composés amorphes, tels que la silice et l'alumine, avec l'hydroxyde de calcium génère des hydrates de silicate / aluminate similaire à ceux produits dans l'hydratation du ciment (effet pouzzolanique) [277,119].

IV.7.4. Porosité des MAP-PB conservés à l'air libre

Les résultats de la porosité en fonction de l'âge de durcissement et de la finesse de la PB pour une substitution de 4% ; 8% ; 12% ; 16% et 20% d'addition conservés à l'air libre sont reportés sur les figures IV.47 et IV.48.

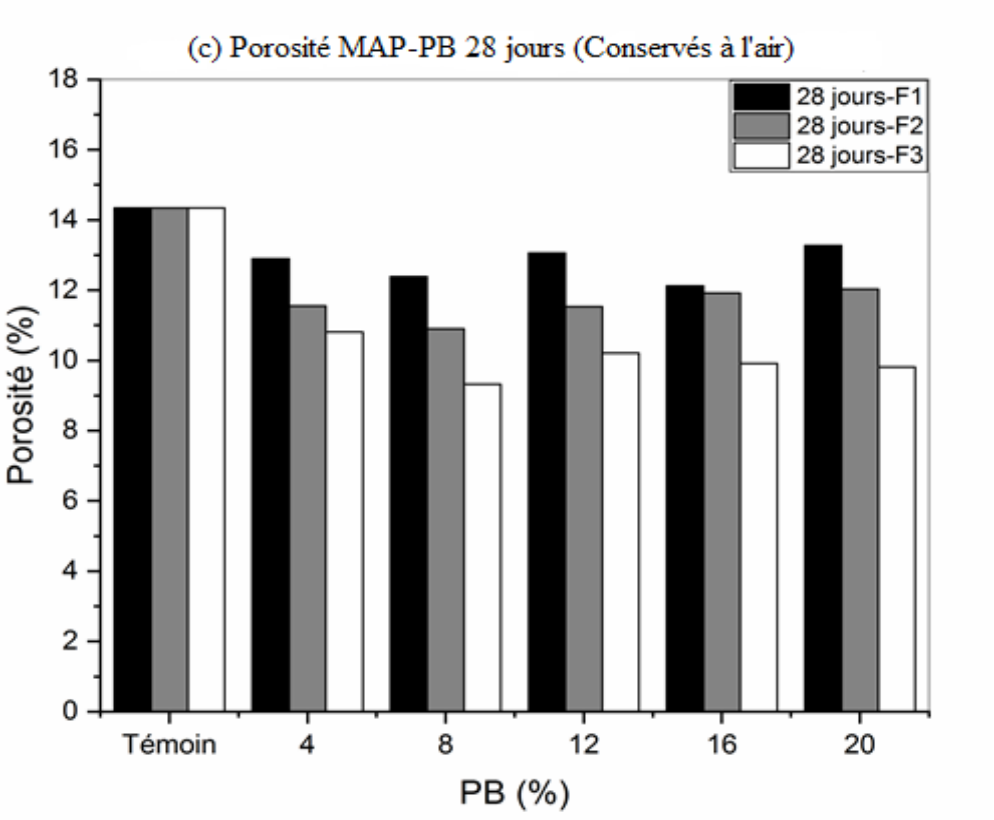


Figure IV.47: Porosité des MAP-PB conservés à l'air libre à 28 jours.

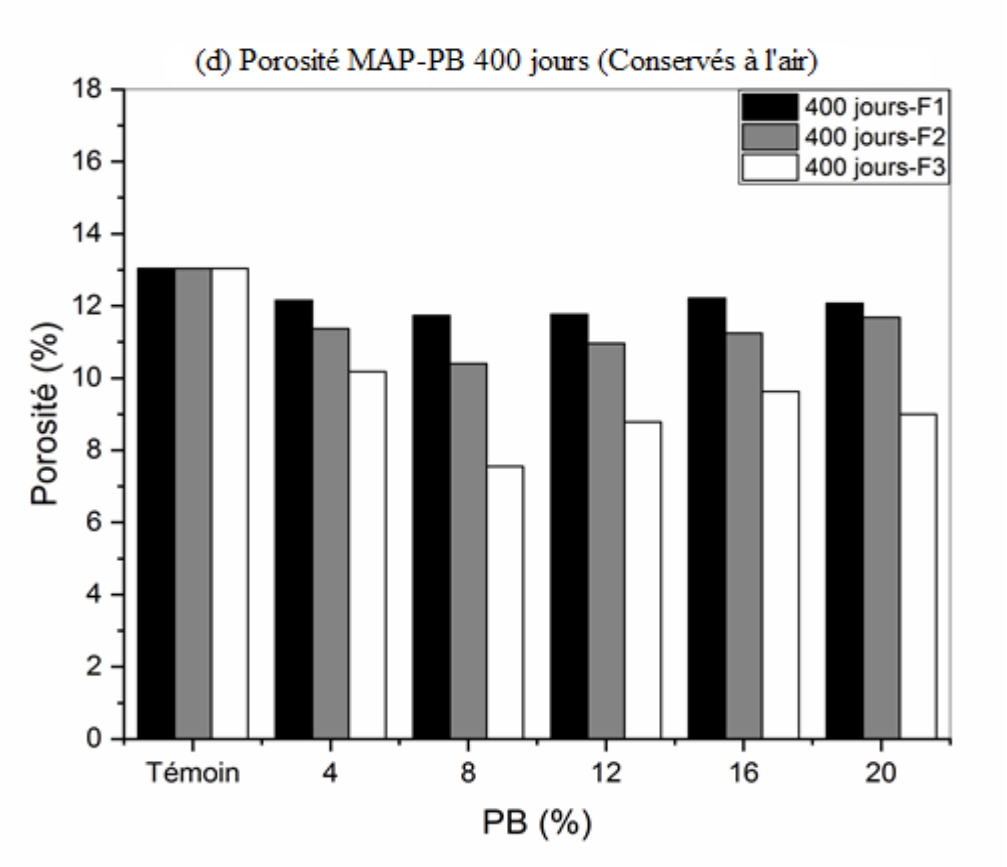


Figure IV.48: Porosité des MAP-PB conservés à l'air libre à 400 jours.

Pour les mélanges conservés à l'air libre, la même tendance de la réduction de la porosité a été observée sauf que les mélanges conservés dans l'eau sont moins poreux.

En comparant la porosité des trois séries de MAP, on peut constater que, les MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) présentent des valeurs de porosité inférieures à celles observées pour des MAP-PBF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PBF1 (3300 cm^2/g). Une réduction de 7% ; 9% ; 7% ; 8% et 4% et de 16% ; 34% ; 25% ; 21% et 26% est observée pour les MPA-PBF2 et MAP-PBF3 respectivement par rapport au MAP-PBF1 à 400 jours. Ce comportement peut être lié à un raffinement de la structure poreuse des MAP-PBF3 produit par l'effet pouzzolanique de la poudre de brique et son effet comblant à cause de sa grande finesse. La poudre d'argile broyée améliore la structure de la pâte de ciment, comble l'espace en réduisant ainsi le volume et le nombre des pores dans la matrice durcie [117,121].

En outre, à l'âge de 400 jours, les MAP à base de la poudre de brique ont développés les meilleures performances comparativement aux mêmes MAP à 28 jours vis-à-vis leurs porosités. En effet, une diminution de l'ordre de 9% ; 6% ; 5% ; 10% ; 1% et 9% et de 9% ; 2% ; 5% ; 5% ; 6% et 3% et de 9% ; 6% ; 19% ; 14% ; 3% et 8% pour les MAP-PBF1, MAP-PBF2 et MAP-PBF3 respectivement avec 0%, 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de PB par rapport aux mêmes MAP à 400 jours.

La même observation est notée quel que soit le taux de substitution de la PB, ou tous les mélanges avec PB montrent des valeurs de porosités inférieures au mortier témoin. Le 8PBF3 est le mélange le moins poreux et la réduction de porosité atteint 42%.
Selon Yuanbo et al. [258], la porosité des pâtes de ciment avec MK diminué à cause de son activité pouzzolanique qui peut consommer l'hydroxyde de calcium dans la solution interstitielle de la pâte de ciment durcie pour générer du gel C-(A-)S-H supplémentaire et du C_2ASH_8, et ces produits d'hydratation peuvent remplir les pores dans la pâte de ciment.

IV.8. Influence de la PV et PB sur le retrait

IV.8.1. Retrait des MAP-PV

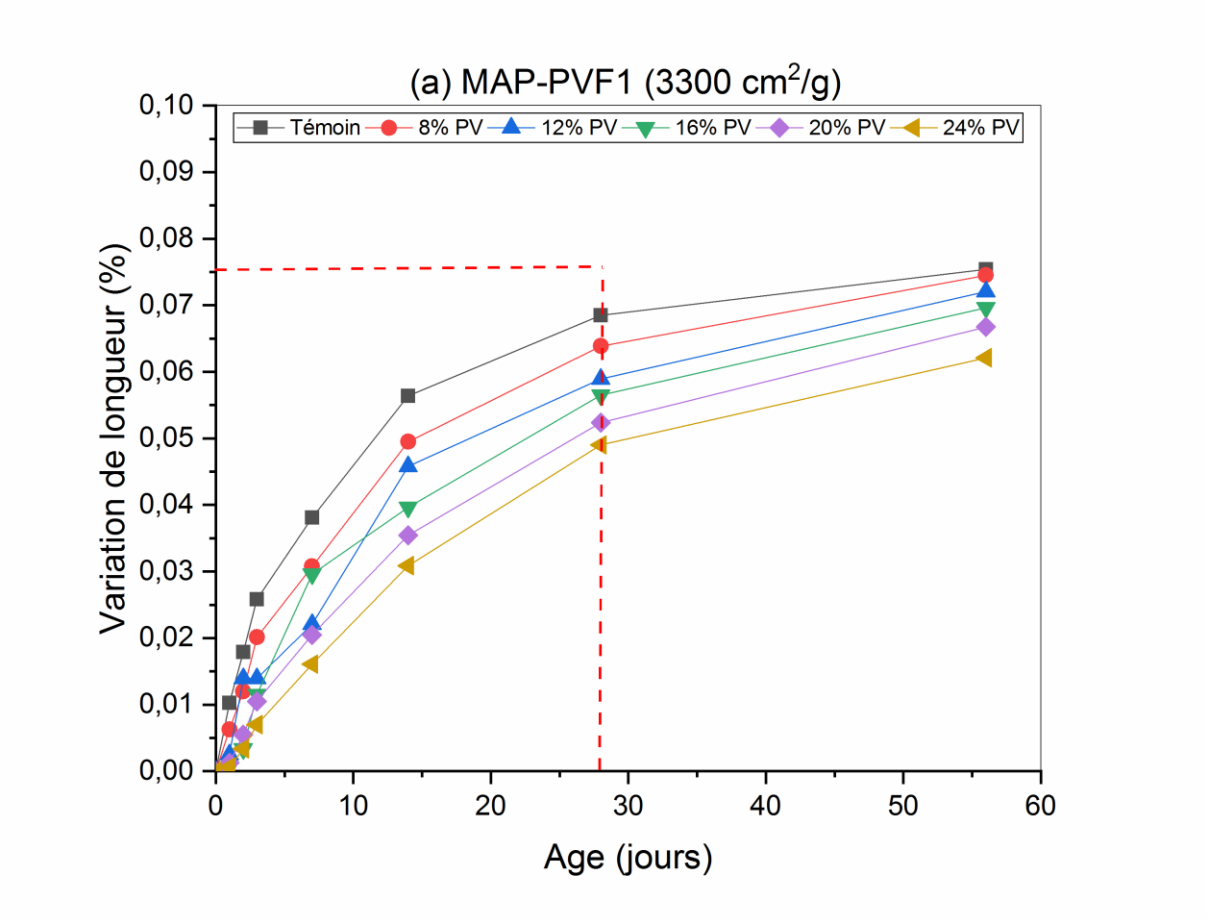


Figure IV.49. Retrait des MAP-PV (F1 :3300 cm^2/g).

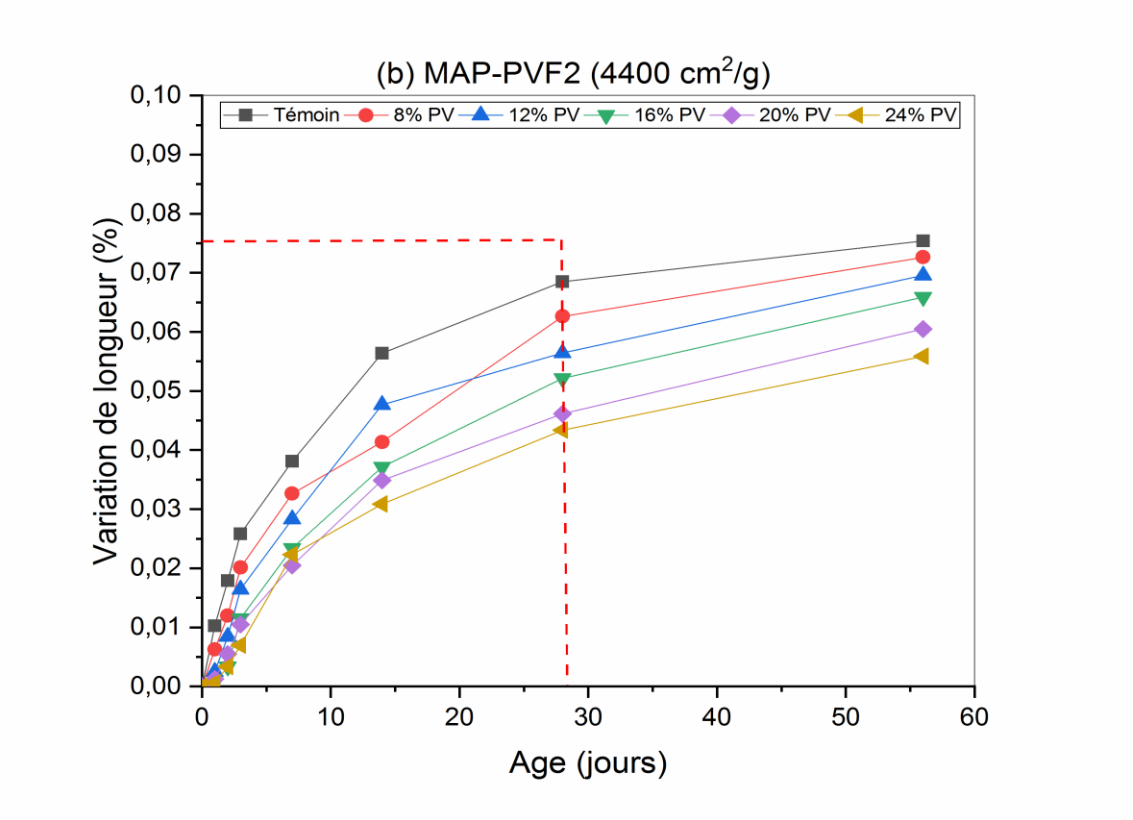


Figure IV.50. Retrait des MAP-PV (F2 :4400 cm^2/g).

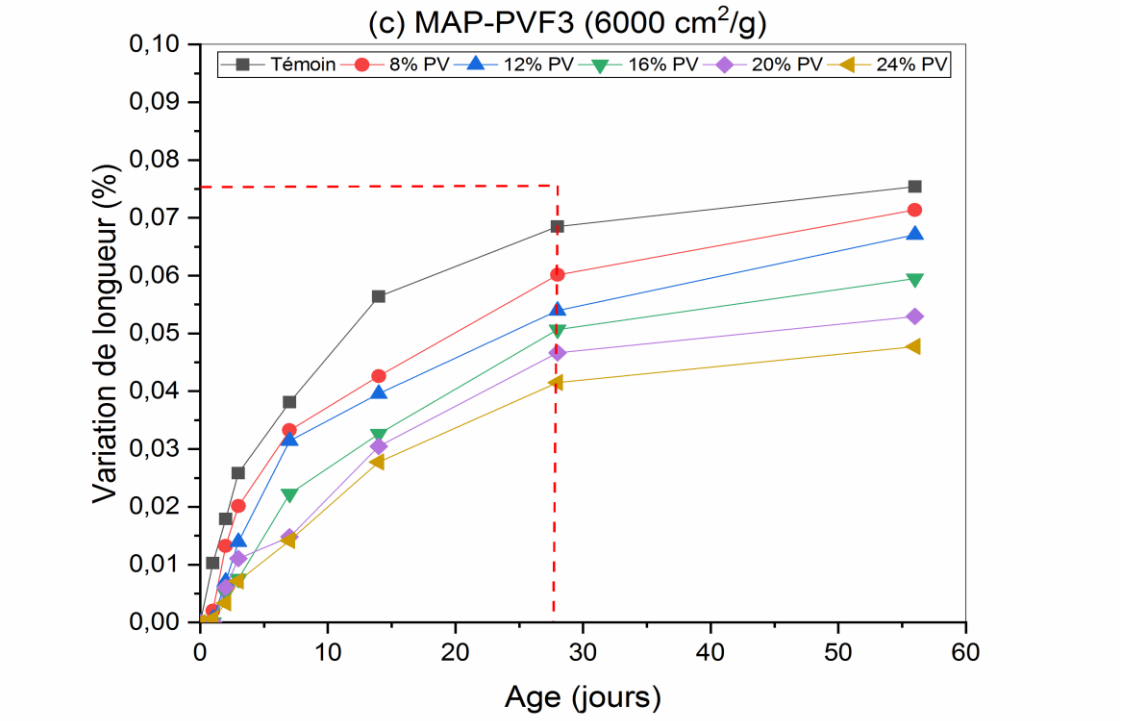


Figure IV.51. Retrait des MAP-PV (F3 :6000 cm^2/g).

L'évolution du retrait des MAP-PV avec trois finesses différentes (F1=3300 cm^2/g, F2=4400 cm^2/g, F3=6000 cm^2/g) en fonction du temps allant jusqu'à 56 jours, est représenté sur les figures IV.49, IV.50 et IV.51.
D'après les résultats, quand la substitution de la poudre de verre augmente, le retrait diminue. Tous les mélanges avaient des valeurs de retrait de séchage inférieur à la limite fixé par la norme australienne de 0,075% à l'âge de 56 jours.

On remarque aussi que l'évolution du retrait est très rapide au cours des 14 premiers jours. Ce résultat peut être attribué à une forte consommation d'eau du au séchage et à l'hydratation du ciment. On peut également constater que le retrait des MAP contenant 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de la poudre de verre comme substitution au ciment est plus faible en comparaison avec celui du mortier témoin à jeune âge.
Ce résultat peut être expliqué par le fait que la PV ralentit la cinétique d'hydratation conduisant ainsi à la formation d'un nombre inferieur d'hydrates comparé avec le mortier à 0% de PV qui se traduit donc par un faible retrait. La diminution du retrait est beaucoup plus prononcée après la première semaine. Cette observation est notée pour les trois finesses adoptées dans notre étude. Pour le MAP-PVF1 (3300 cm^2/g) avec 24%, la diminution de retrait est d'environ 18% et de 26% pour le MAP-PVF2 (4400 cm^2/g), tandis que le retrait diminue de 37% pour le MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) par rapport au mortier témoin à 56 jours.

L'augmentation de la finesse de PV a conduit à une diminution de retrait, comme montrent les figures IV.49, IV.50 et IV.51. Le rétrécissement de MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) est plus faible que celui de MAP-PVF2 (4400 cm^2/g) et MAP-PVF1 (3300 cm^2/g).
La réduction du retrait de séchage en présence du PV peut être liée à la faible absorption d'eau par le verre, ce qui entraine un excès d'eau dans le béton [88,55]**.** Les résultats indiquant que l'utilisation de 24% PV est la meilleure en termes de réduction de rétrécissement.

Des recherches antérieures [276] ont confirmé que le retrait de béton contenant de la poudre de brique diminue avec l'augmentation de la teneur en PV, et le mélange avec 20% PV présente un retrait minimum. D'autre part, Patel et al. [277] ont constaté que la présence de la poudre de verre à des taux de 10% et 20% avec des tailles de particules de PV75 (verre dépoli passant 100% au tamis de 75 µm) et PV63 (verre dépoli passant 100% au tamis de 63 µm) engendre une nette réduction du retrait comparé au mortier du contrôle et le PV63 a le retrait de séchage le plus faible .
Tan et al. [31] ont montré, en étudiant les propriétés de mortier contenant de la poudre de verre de couleur mixte comme sable que tous les mélanges contenant 25%, 50%, 75% et 100% de verre présentent un retrait stable après 21 jours. Les valeurs de retrait du séchage étaient inférieures à 750 $\times 10^{-6}$ mm à 56 jours, spécifié comme acceptable pour le béton par la norme australienne AS3600 et le mortier sans verre présente le retrait de séchage le plus élevé.

IV.8.2. Retrait des MAP-PB

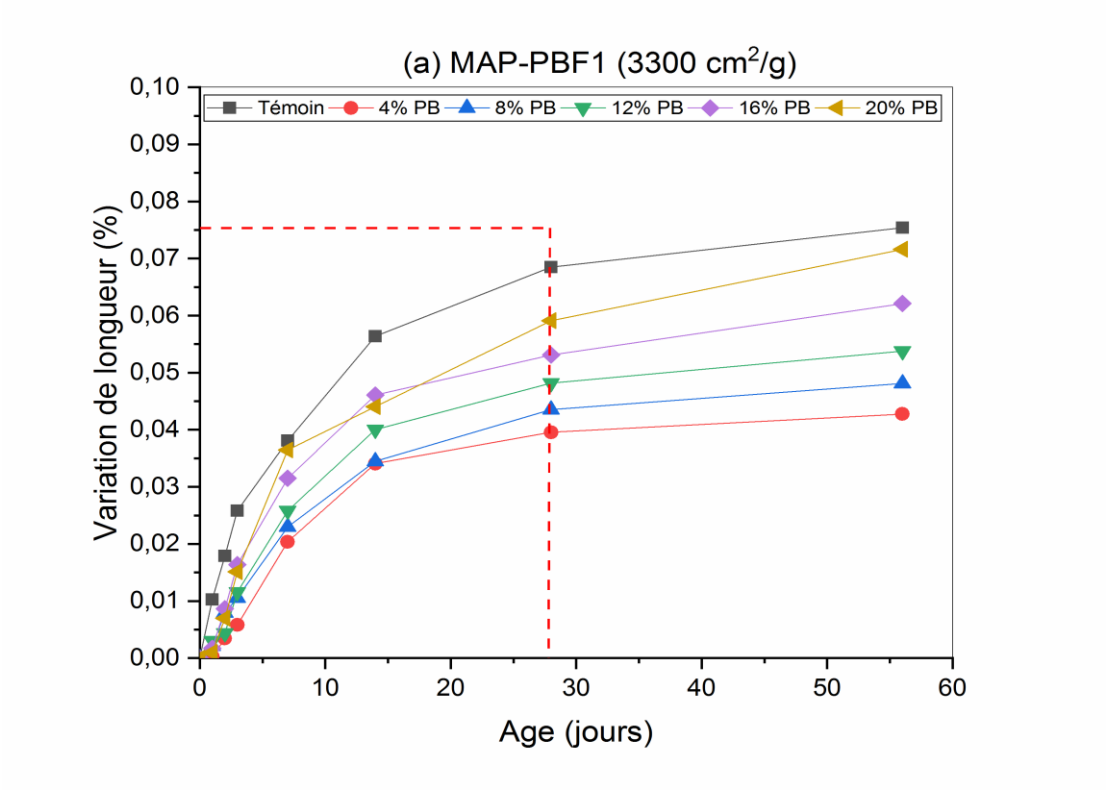


Figure IV.52. Retrait des MAP-PB (F1:3300 cm²/g).

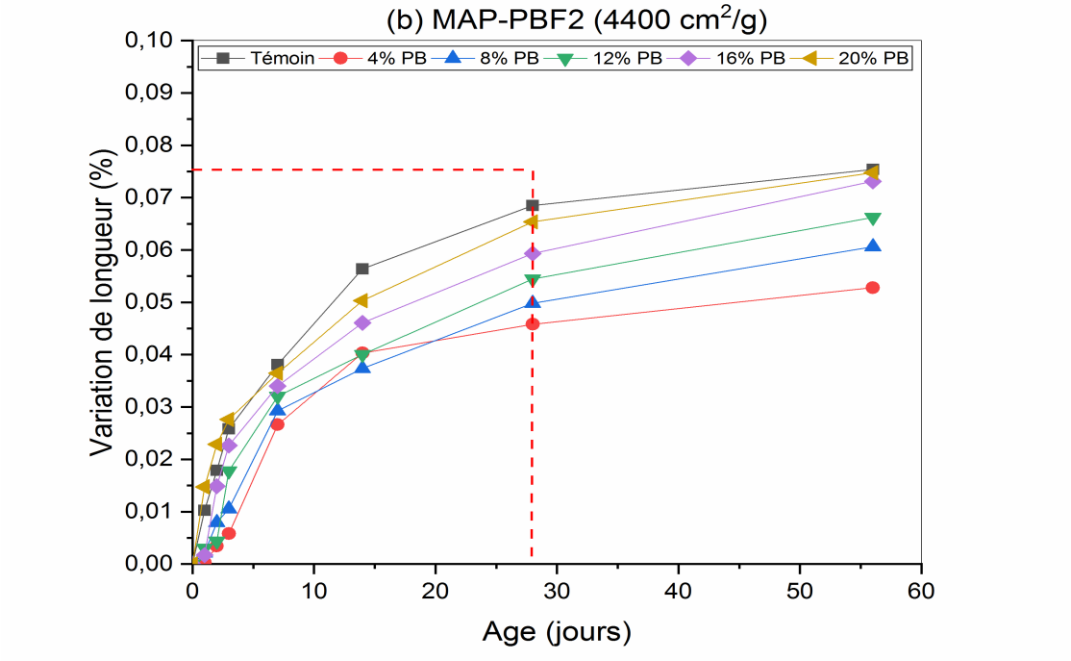


Figure IV.53. Retrait des MAP-PB (F2:4400 cm²/g).

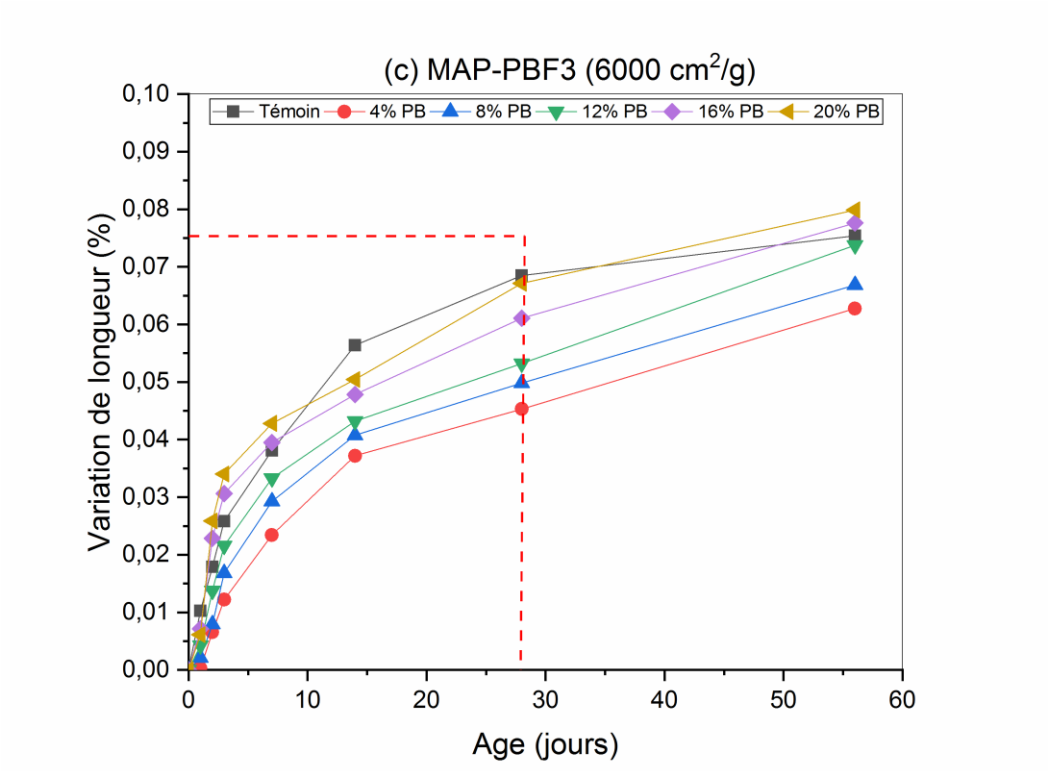


Figure IV.54. Retrait des MAP-PB (F3:6000 cm²/g).

Le développement du retrait des mortiers autoplaçants, en fonction du taux de substitution de la poudre de brique pour chaque finesse étudiée, est représenté sur les figures IV.52, IV.53 et IV.54.

Le retrait augmente dans le temps et aussi avec l'introduction progressive de la poudre de brique. En général, le retrait augmente avec l'augmentation de la quantité de PB mais il reste toujours inferieurs au retrait de MAP témoin pour les MAP-PBF1 (3300 cm²/g) et MAP-PBF2 (4400 cm²/g).

Le MAP-PBF3 (6000 cm²/g) par contre avait les valeurs de retrait de séchage les plus élevés en comparant avec les MAP-PBF2 (4400 cm²/g) et MAP-PBF1 (3300 cm²/g). Contrairement au MAP-PV, l'augmentation de la finesse de la PB a entrainé une augmentation de retrait, c'est peut être due à la forte absorption d'eau de la poudre de brique qui a entrainé une évaporation importante de la quantité d'eau [118].

Il est bien observé qu'en substituant le ciment par la poudre de brique, le mortier développe un retrait légèrement supérieur aux premiers jours quel que soit la surface spécifique de la poudre de brique. En effet, les valeurs du retrait des mortiers avec 16% et 20% de la poudre de brique des MAP-PVF3 (6000 cm²/g) atteignent une augmentation de 4 % et 12 % (à 7 jours), respectivement.

Après 14 jours, l'incorporation de la poudre de brique dans les mortiers entraîne une baisse du retrait par rapport au mélange témoin. Cette observation est notée pour les MAP-PVF1 (3300 cm²/g) et MAP-PVF2 (4400 cm²/g).

Cette diminution des valeurs de retrait peut être attribuée à la densification de la pâte de ciment hydratée et au ralentissement de l'évaporation de l'eau qui en résulte. Une autre raison de ce phénomène pourrait être liée à l'activité pouzzolanique latente de la poudre de brique au jeune âge induisant ainsi une formation retardée d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H). Par conséquent, la quantité d'eau consommée par l'hydratation est moins importante, ce qui génère un retrait de séchage inférieur par rapport à celui du mortier témoin. En outre, le rétrécissement de 4% PB, 8% PB et 12% PB est respectivement 43%, 36% et 29% inférieur à celui de MAP témoin à 56 jours pour le MAP-PBF1 (3300 cm^2/g),et de 30%, 20% et 12% pour le MAP-PBF2 (4400 cm^2/g), et de 17%,11% et 2 % pour le MAP-PBF3 (6000 cm^2/g). Cette réduction de rétrécissement peut aider à éviter les fissures de retrait et donc améliorer la durabilité de la structure coulée en béton contenant de la PB [118,142]**.**

Cependant, à des stades de séchage plus avancés et pour les MAP-PBF3 (6000 cm^2/g) avec 16% et 20% de PB, le retrait est supérieur à celui du mortier témoin. Comme le montrent la figure IV.54, la substitution de 16 % et 20% du ciment par de la poudre de brique a provoqué une augmentation du retrait de 3 % et 6 % respectivement pour MAP-PBF3 à 56 jours.

Selon Shah et al. [265], l'incorporation de 20% de la poudre de brique pouvait réduire le rétrécissement au jeune âge de −500 à −300 μm/m de BAP ; ainsi, la stabilité volumétrique est améliorée. Une autre étude menée par Zhao et al. [278] montre que la substitution du calcaire par la PB diminuait le retrait de séchage du MAP en raison de son activité pouzzolanique, qui affinait la structure des pores. Zhu et al. [279] ont noté que le retrait des mélanges avec 0%, 40% et 100% de la poudre de brique recyclée s'est développé de manière significative avant 28 jours et le développement a été faible par la suite. Le retrait a été réduit de manière significative à tous les âges et le taux de développement a également diminué avec l'augmentation de la teneur en PB. Certains auteurs [140] ont souligné que l'augmentation de volume de la poudre de brique engendre une diminution de retrait. La diminution est d'au moins 36% pour un taux de substitution de 20% de PB.

Les résultats d'autres travaux [280] ont affirmé que la PB peut diminuer le rétrécissement du BAP. La diminution de retrait change avec le taux de remplacement de PB, plus le taux de remplacement est élevé, plus le retrait diminue. La réduction de retrait endogène pourrait également être causée par une faible réactivité et absorption d'eau élevée de la poudre de brique. La PB pourrait réduire le retrait endogène en raison de l'effet de dilution. Cependant, le résultat a montré une réduction de plus de 30 % avec seulement 5% de PB. Par conséquent, l'autre raison de la réduction de retrait endogène est l'effet de durcissement interne. Comme l'humidité relative à l'intérieur du béton diminuait à cause de l'hydratation du ciment, l'eau absorbée par la PB a été libéré pour maintenir le béton à l'état saturé ; le retrait était donc réduit.

IV.9. Influence de la PV et PB sur la réaction alcali-silice (RAS)

IV.9.1. Réaction alcali-silice des MAP-PV

La réaction alcali-silice (RAS) est une réaction qui se produit entre la silice du verre ou de la brique et les ions alcalins de la solution interstitielle des pores du ciment. La cinétique de l'attaque est gérée par un ensemble de paramètres tel que le PH et la concentration des alcalins (surtout (Ca2+) qui facilement réagit avec la silice (SiO2) et forme un gel expansif qui augmente de volume avec l'absorption de l'eau. Ce qui génère des désordres dans les bétons : fissuration, expansion et baisse des performances mécaniques.

Les résultats des tests d'expansion d'alcali-silice (RAS) pour les différentes compositions des MAP-PV avec une finesse de 4400cm^2/g en fonction de la durée d'immersion dans la solution de l'hydroxyde de sodium (NaOH) de 1% de concentration sont illustrés à la figure IV.55.

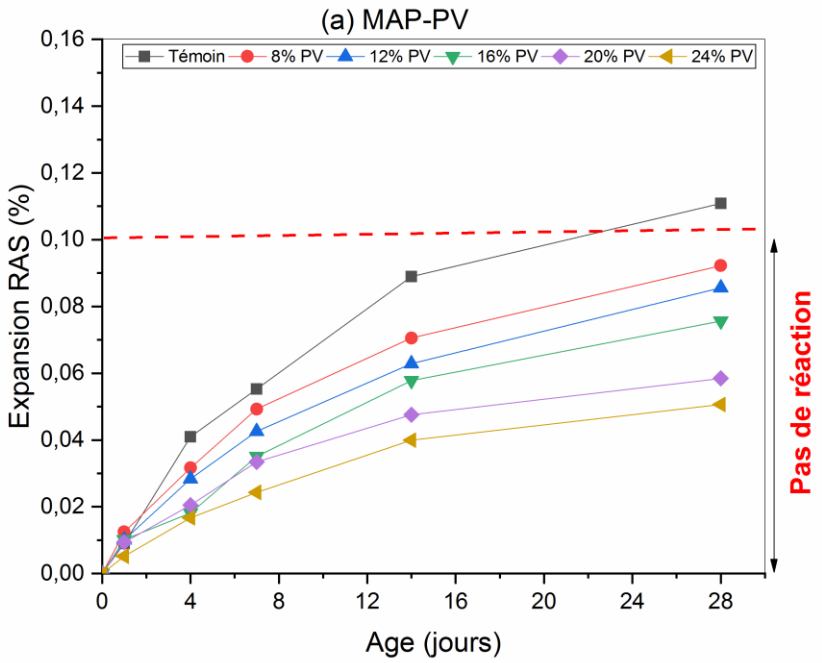


Figure. IV.55. Réaction alcali-silice (RAS) des MAP-PV.

Tous les mélanges incorporant la poudre de verre présentent des expansions inférieures à celles du témoin. Nous constatons une augmentation continue de l'expansion de tous les mélanges jusqu'à 28 jours, la cinétique initiale varie entre 0,01%/ à 0,055% à 4 et 7 jours respectivement. Les autres valeurs d'expansion variaient de 0,039% à 0,11% à 14 et 28 jours et étaient quasiment stables. La figure IV.55 illustre que l'expansion de chaque spécimen était inférieure à 0,10%, ce qui montre qu'il n'y a pas eu d'expansion dans les échantillons de mortier avec la poudre de verre selon la norme ASTMC1260.

Une diminution de l'expansion avec l'augmentation de la teneur en PV est observée pour tous les mélanges. Une réduction de 21% ; 29% ; 35% ; 47% et 55% à 14 jours, et de 17% ; 23% ; 32% ; 47% et 54% à 28 jours pour les MAP-PV avec 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de PV par rapport au mortier témoin.

La diminution de l'expansion peut être attribuée à l'effet pouzzolanique de la poudre de verre. La réduction de l'expansion due à la RAS par la poudre de verre a été également observée par Shayan et al. [57]. II a été également rapporté dans plusieurs travaux que les ajouts cimentaires par leur activité pouzzolanique peuvent réduire l'activité des alcalis dans une matrice cimentaire [281]. D'après Shi et al. [85], la substitution du ciment par 20% de la poudre de verre ou de cendre volante réduit l'expansion de RAS. En outre, Guojun et al. [87] ont signalé que la poudre de verre avec une granulométrie allant de 28 à 53 µm présente l'expansion RAS la plus faible aux différents âges de durcissement. L'expansion des compositions de 20% et 30% de PV est largement inférieure au mélange de contrôle, la réduction est de 80,39 % et 89,54% respectivement.
La grande finesse des poudres de verre et de brique pourrait inhiber avec succès la RAS en plus du rôle important qu'elle joue dans la densification de la microstructure du matériau.

IV.9.2. Réaction alcali-silice des MAP-PB

Les résultats de de la réaction alcali-silice des MAP-PB à des âges de durcissement de 1, 4, 7, 14 et 28 jours avec une finesse de 4400cm^2/g sont illustrés à la figure IV.56.

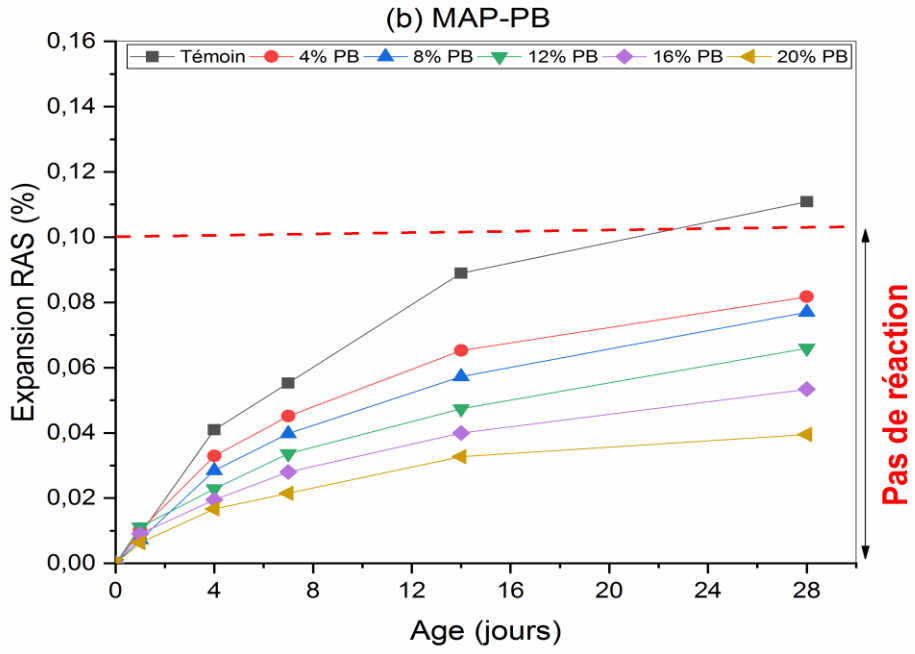


Figure. IV.56. Réaction alcali-silice (RAS) des MAP-PB.

Comme montre la figure IV.56, une réduction d'expansion due à l'RAS pour les MAP-PB par rapport au mortier témoin est observée. Du même, une diminution de l'expansion avec l'augmentation de la teneur en PB est noté.

L'expansion de MAP-PB est largement inférieure au mélange de contrôle, la réduction est de 27% ; 36% ; 47% ; 55% et 63% à 14 jours, et de 26% ; 31% ; 41% ; 52% et 64% à 28 jours pour les MAP-PB avec 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de PB comparé au mortier témoin. Ce résultat est en accord avec d'autres études [141].

Turnali et al. [135] ont montré que l'incorporation de 30% de la poudre de brique avec une finesse de 4260 cm^2/g réduit l'expansion de 88% par rapport au mélange de contrôle à 14 jours. Du même, une réduction de 75% de l'expansion a été trouvée à 30 jours. D'autre part, Afshinia et al.[132] ont rapporté que la substitution du ciment avec 10 et 25% de la PB réduit l'expansion due à la réaction alcali silice de 22% et 47% respectivement comparé au mortier témoin. La taille des particules de brique joue un rôle important pour atténuer l'expansion de RAS dans les mortiers.

Une légère amélioration de comportement vis à vis de la RAS des MAP-PB par rapport au MAP-PV peut être observé à partir des résultats présentés sur les figures IV.55 et IV.56.
La diminution d'expansion due à la RAS a un âge précoce pourrait être due à la réaction pouzzolanique de PV et PB. La silice réactive disponible dans la PV et PB va se dissoudre rapidement au cours de la réaction pouzzolanique qui se produit plus tôt qu'RAS. Par conséquent, à un âge ultérieur, il n'y aurait pas assez d'alcali libre pour interagir avec la silice réactive, à cause aussi de la consommation de l'alcali dans la structure de gel C-S-H pendant la réaction pouzzolanique [284,88].

L'analyse par le MEB a été effectuée pour déterminer la microstructure détaillée des mortiers contenant 12% PV et 8% PB et aussi le mortier témoin. Les images de mortiers durcis pendant 90 jours de durcissement sont présentées dans les figures IV.57, IV.58 et IV.59. Les figures révèlent la présence de quelques fissures.

Concernant le mortier témoin, nous avons remarqué que l'échantillon présentait des quantités importantes de gel et sont affectés par la RAS. Le gel occupe les vides et les interfaces ciment/sable, et se propage à travers la pâte de ciment ce qui développe une micro-fissuration considérable (figure IV.57). On a remarqué que pour la composition à 12% PV, peu de vides sont présents à l'intérieure de mortiers. Pour le mélange à 8% PB on voit que ce mélange montre très peu de fissures et de vides à l'intérieur, donc on peut le considérer comme un mélange inoffensif.

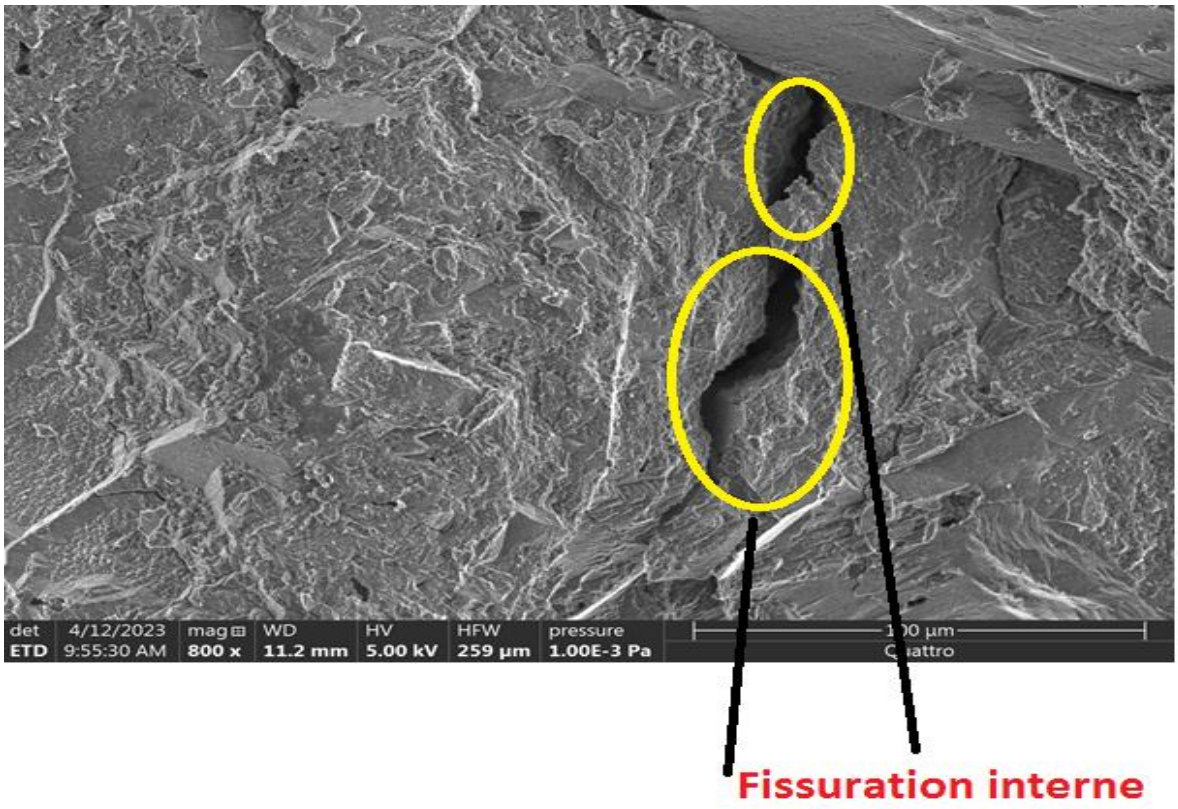


Figure IV.57. Examen au MEB du MAP témoin après le test de RAS.

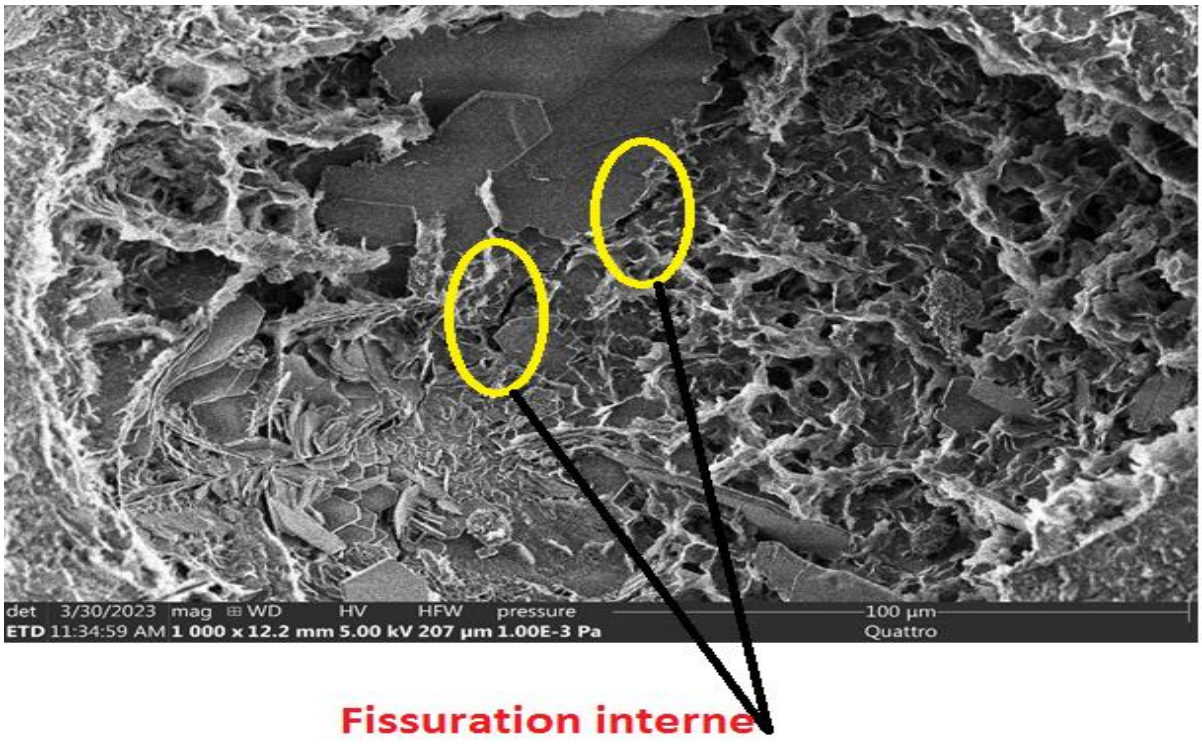


Figure IV.58. Examen au MEB du MAP à 12% PV après le test de RAS..

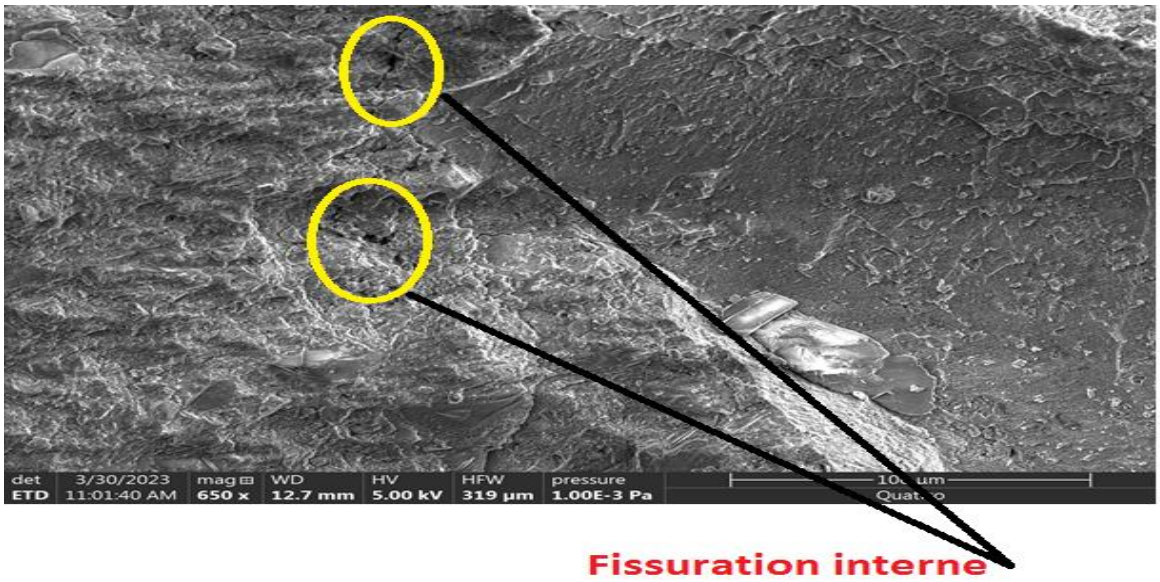


Figure IV.59. Examen au MEB du MAP à 8% PB après le test de RAS.

IV.10. Influence de la PV et PB sur la résistance à haute température

IV.10.1. Résistance à haute température des MAP-PV

Les figures IV.60 (a et b) montrent les résultats de la résistance à la compression résiduelle (RCR) des MAP-PV après avoir été soumis à des températures de 400°C, 600°C et 800°C. Le test est fait à 90 jours pour des échantillons durcis dans l'eau et à l'air libre.

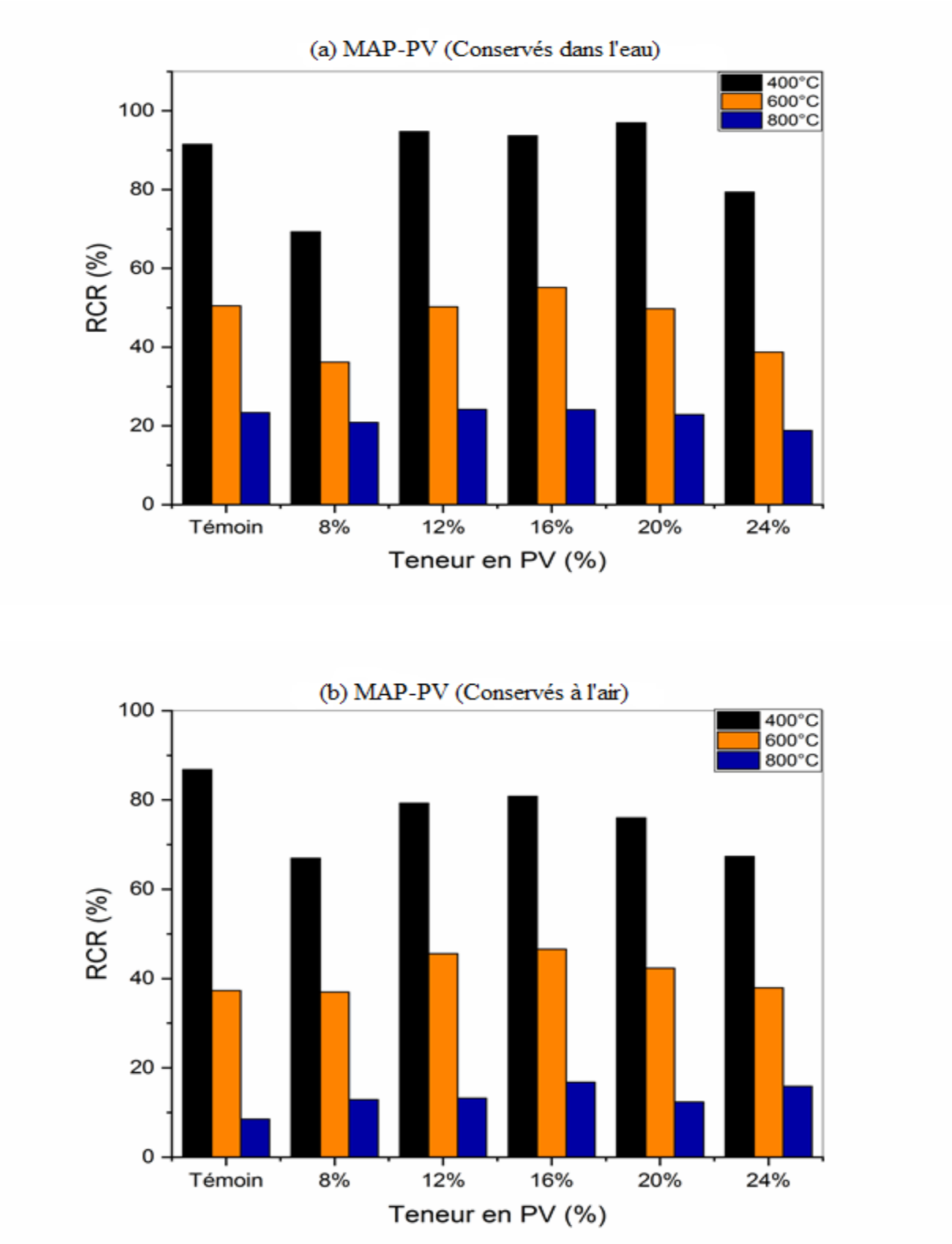


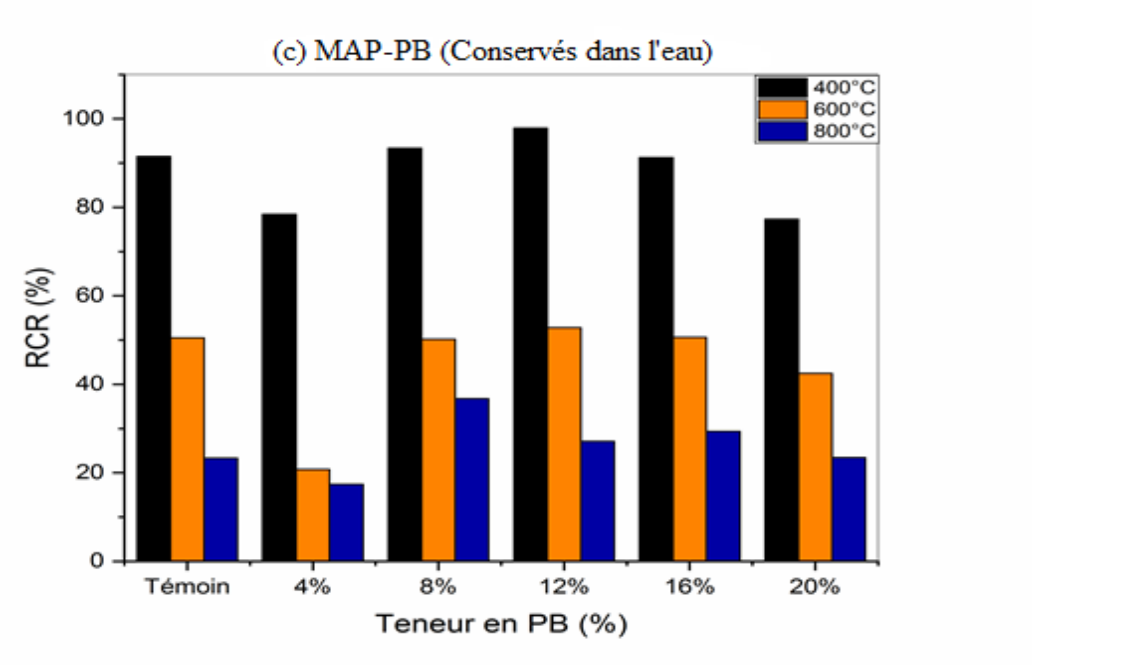
Figure IV.60. Résistance à haute température des MAP-PV durci dans a) l'eau b) l'air.

Les résistances à la compression à température ambiante (20° C) sont considérées représentées 100 % des performances du matériau et les changements de résistance par rapport à la résistance mesurée à 20°C sont illustrés dans ces figures.

Les résultats indiquent que la résistance à la compression résiduelle diminue à mesure que la température passe de 400°C à 600°C et de 600°C à 800°C. Les résistances à la compression les plus élevée ont été obtenue à 400°C.
Les valeurs les plus élevées étaient obtenus pour les échantillons conservés dans l'eau.à 400°C, la résistance résiduelle des MAP-PV conservés dans l'eau et à l'air libre variait de 69% à 96% et de 66% à 80% respectivement. La raison qui conduit à la perte de la résistance à des températures élevés est la décomposition des produits d'hydratations qui commence à partir de 105°C, la première étape de la décomposition chimique et physique consiste à libérer de l'eau dans les pores et de l'eau liée chimiquement dans la structure des gels de silicate de calcium hydraté (C-S-H), Ce processus est appelé déshydratation. Au cours de cette étape, d'autres hydrates et l'ettringite commencent également à se décomposer [285,286]. Vers 300–400 °C, l'eau intercalaire liée chimiquement dans le gel C-S-H s'évapore [287].
D'autre part, on constate qu'à 600°C, la résistance à la compression résiduelle a considérablement diminué. La réduction de la résistance était d'environ 36% à 55% et de 37% à 46,6% pour les MAP-PV durcies à l'eau et à l'air respectivement, par rapport aux valeurs initiales. Les résultats concordaient bien avec celui des études précédentes [287,288].
Comme la température atteint 800 °C, une perte de résistance importante est remarquée pour tous les mélanges avec des fissurations. Généralement, la quasi-totalité du constituant du béton se décompose à 800°C, ce qui conduit à une perte de résistance et de poids significative [290,291,292].

Ling et al. [291] ont étudié l'effet des granulats de verre des bétons exposés à des hautes températures. Ils ont constaté que l'inclusion de verre recyclé peut aider à maintenir les propriétés du béton exposé à des températures élevées, car le verre recyclé fondu et se solidifie ensuite dans la matrice et remplit les pores, ce qui augmente la compacité du béton.

IV.10.2. Résistance à haute température des MAP-PB



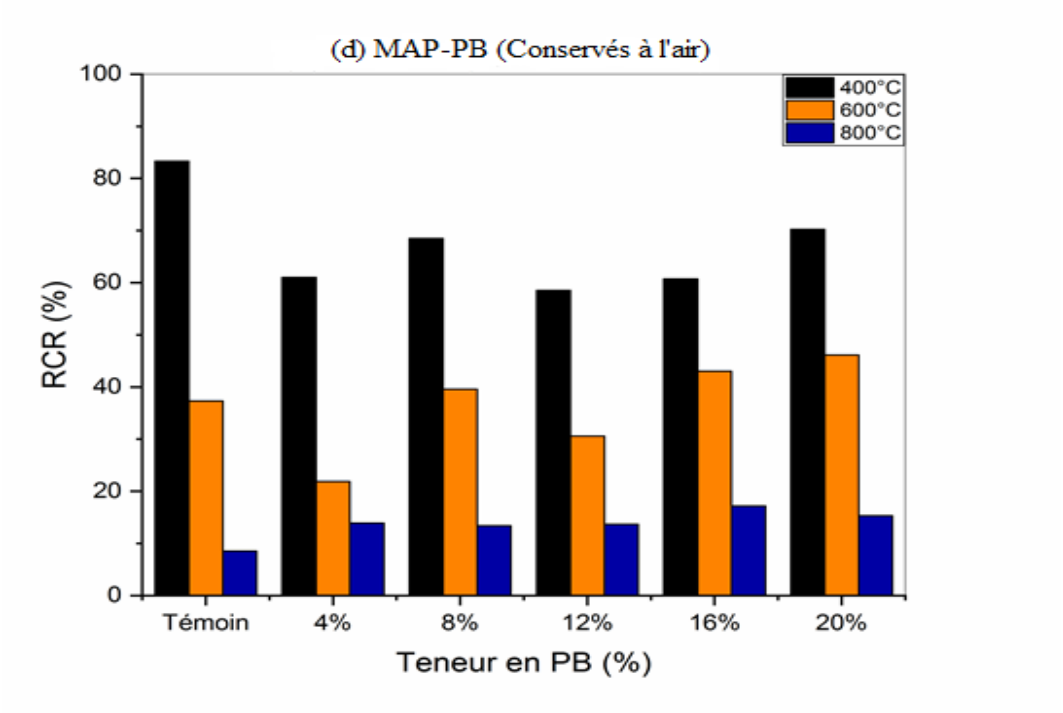


Figure IV.61. Résistance à haute température des MAP-PB durci dans c) l'eau d) l'air.

La figure IV.61 (c et d) présente la variation de résistance à la compression résiduelle des éprouvettes de MAP contenant différents pourcentages de PB. La perte de résistance de tous les mélanges des MAP-PB diminue à mesure que la température d'exposition augmente. Cette réduction est due à la déshydroxylation du Ca(OH)2, de la dissociation de CaCO3 en CaO et le CO2 accompagné d'une recristallisation des phases non liantes du ciment hydraté, ce qui est connu comme l'effondrement de l'intégrité structurelle et de la perte en résistance à la compression [292].

D'après les résultats obtenus, on peut observer que les MAP-PB exposés à 400°C conservés dans l'eau et à l'air, présentent des résistances résiduelles variant de 77% à 97% et de 60% à 70% respectivement.
Pour les mortiers exposés à 600°C, la Résistance à la compression résiduelle a considérablement diminué plus que dans le cas d'exposition à 400°C. La réduction de la RCR est de 20% à 52,8% et de 21,9% à 46% pour les MAP-PB conservés dans l'eau et à l'air libre respectivement, par rapport aux valeurs initiales. Un effondrement total a été observé pour des éprouvettes exposées à 800°C.

Cependant, la résistance à la compression résiduelle de tous les MAP préparés avec les PB conserver à l'air à 800°C était supérieure à celle des échantillons témoin, ce qui permet de dire que les PB ont contribué à l'amélioration de la RCR. Certains auteurs ont examiné plusieurs matériaux à base le métakaolin, la fumée de silice et la cendre volante, et ont trouvé une amélioration de la compression résiduelle [295,296].

L'ajout de 16% PV et 12% PB ont augmenté la résistance à haute température des MAP en raison de la faible porosité des mélanges due à la grande surface spécifique des poudres qui rend la microstructure plus dense en plus du caractère réfractaire des produits argileux comme

il est également connu que les matériaux pouzzolaniques augmentent la résistance au feu des bétons [288].

IV.11. Analyse microstructurale

Les figures IV.62, IV.63 et IV.64 présentent la microstructure des mélanges MAP témoin, 20% PV F2 (4400 cm^2/g) et 20% PB F2 (4400 cm^2/g) après 90 jours de durcissement. En concentrant l'attention sur la microstructure et la composition des phases des produits d'hydratation. On remarque qu'a 90 jours, les MAP témoin, 20% PV et 20% PB sont devenue denses et plus compacts.

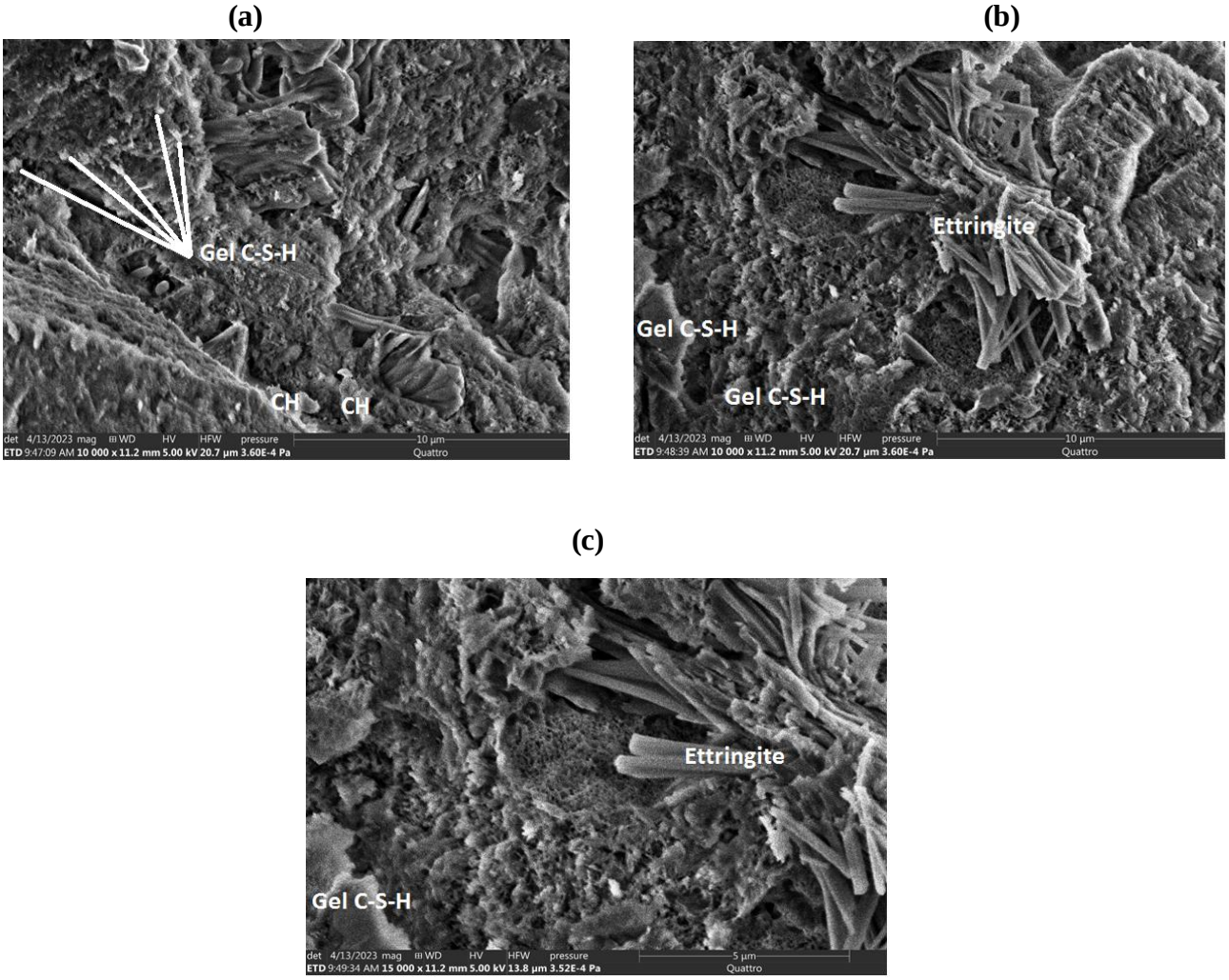


Figure IV.62. Examen au MEB du mélange pour le MAP Témoin (a,b,c).

A 90 jours, le cristal Ca (OH)2 a été considérablement érodé, ce qui peut être causé par la réaction pouzzolanique de la PV et PB.

La composition de MAP témoin comprenait des pics d'hydroxyde de calcium CH et des hydrates de silicate de calcium C-S-H. Pour le 20% PV, on observe des gels CH et C–S–H qui remplissent les pores et rendent la microstructure du mortier plus compacte, des cristaux de sulfo-aluminate de calcium (ettringite) en forme d'aiguille sont toujours présents.

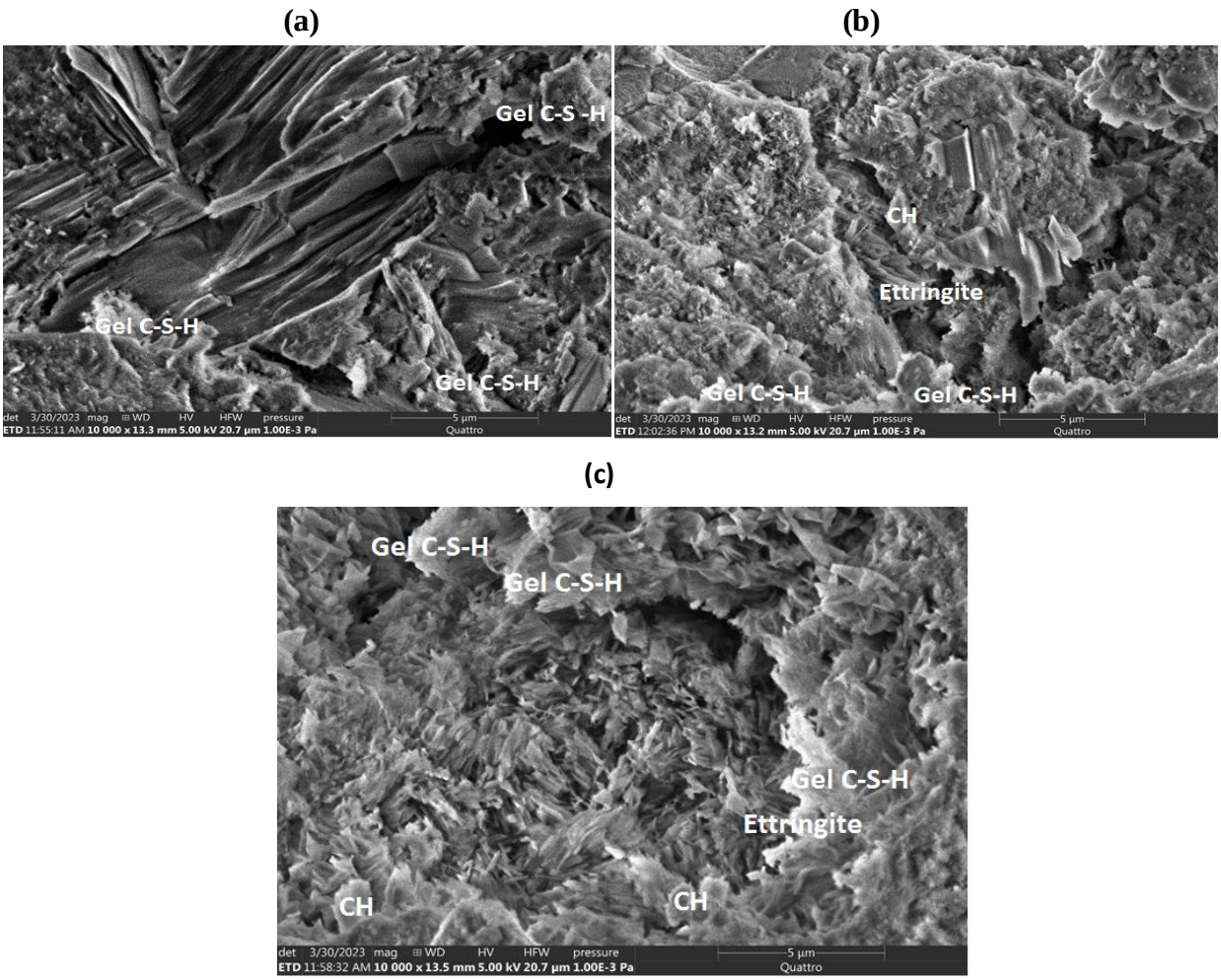


Figure IV.63. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base de 20% PV F2 (a,b,c).

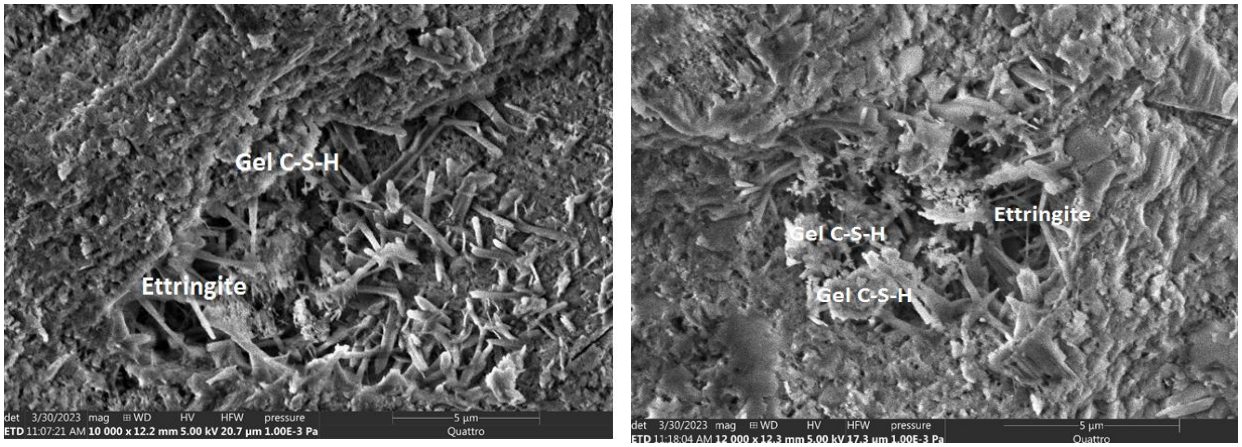
L'introduction de 20% PV a conduit à une amélioration du système de pores des mélanges. Pour ce MAP à 20% PV, les pores ont été correctement remplis avec le gel C-S-H supplémentaire ce qui provoque sa densification et améliore la résistance à la compression et à la flexion par rapport au MAP témoin.

La micrographie MEB affiche une grande quantité de gel CSH pour le MAP avec 20%PB. Au fur et à mesure que la réaction pouzzolanique se poursuivait, le CH est consommé pour produire un nouveau gel C-S-H pour remplir certains pores ouverts et former une structure compacte. Ainsi, des quantités modérées de CH et d'ettringite ont été observé. Ce dernier est le principal produit de réaction entre l'aluminate de calcium et le sulfate de calcium. C'est clair que l'échantillon contenant 20 % de PB a la plus petite taille et la meilleure structure de pores. Par rapport au MAP témoin, le MAP avec 20% PB contenait plus de gel C-S-H et était plus uniforme et compact (Figure IV.63).

Une comparaison qualitative des images révèle que 20% PV et 20% PB à 90 jours de durcissement ont une structure moins poreuse que le MAP témoin.

Une réduction de la porosité par rapport au témoin a été observé dans les mélanges avec 20% PV et 20% PB à 90 jours, et cela est dû à la surface spécifique plus élevée des poudres de substitution qui raffine la structure poreuse des MAP-PV et MAP-PB conduisant à une diminution de l'absorption et à une augmentation de la résistance.

(a) **(b)**



(c)

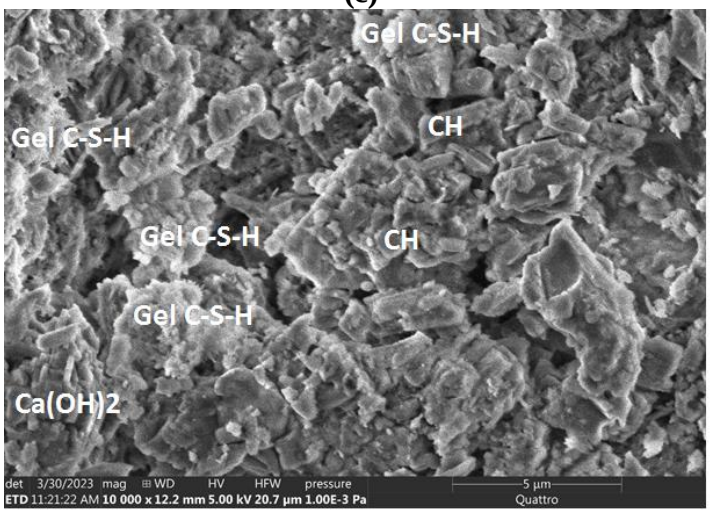


Figure IV.64. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base de 20%PB F2 (a,b,c).

IV.12. Comparaison des résultats entre les compositions avec PV et PB

Une comparaison des résultats trouvés pour les MAP-PV et MAP-PB avec une finesse F2 (4400 cm^2/g) est réalisée et les résultats sont reportés dans le tableau IV.5.
En prenant le meilleur résultat pour chaque propriété choisie parmi les formulations des deux composés élaborés (MAP-PV ou MAP-PB) à différents taux de substitution du ciment.

On constate que pour une même durée de cure (90 jours) dans l'eau, Le mortier autoplaçant (MAP-8% PB F2) avec 8% de la poudre de brique de finesse F2 est plus résistant à la compression (avec un gain de 17%) que le mortier autoplaçant (MAP-12% PV F2) contenant 12% de la poudre de verre, tandis que le la résistance à la flexion est presque identique.

Concernant le retrait et la réaction alcali silice (RAS), la poudre de verre agit positivement en les réduisant, alors que si la proportion de ciment remplacée par de la poudre de brique augmente, l'RAS diminue mais le retrait augmente. A 56 jours, le rétrécissement est de 0,0558 % et 0,0528 %, respectivement pour les MAP-24% PV F2 et MAP-4% PB F2, et à 28 jours, le rétrécissement est de 0,05063 % et 0,03954 %, respectivement pour MAP-24% PV F2 et MAP-20%PB F2.

En portant des échantillons de matériaux composites à haute température, la résistance diminue plus ou moins rapidement après l'apparition de fissures qui affaiblissent le matériau, mais à 400 °C le MAP-20% PV F2 conserve 96% de sa résistance initiale et reste supérieure de 5 % par rapport au mortier témoin, tandis que pour le mortier MAP-12% PB F2, il conserve 98 % de sa résistance initiale, et se classe meilleur que le mortier témoin avec 7 % plus grande. Le but de l'étude est de déterminer l'optimum de chaque composé binaire (MAP-PV et MAP-PB) ayant donné les meilleures performances, puis à les combiner pour former un composé ternaire (Ciment+12%PV+8%PB). Ceci fera l'objet du chapitre V.

Tableau IV.5 : Résultats des tests des compositions optimales des mortiers fabriqués avec les poudres de verre et de briques

Composition optimale	Propriété	Résultats
MAP-12%PV F2 MAP-8%PB F2	Résistance à la compression (MPa) à 90 jours	60.32 70.74
MAP-12%PV F2 MAP-8%PB F2	Résistance à la flexion (MPa) à 90 jours	10.77 10.84
MAP-24%PV F2 MAP-4% PB F2	Retrait (%) à 56 jours	0.0558 0.0528
MAP-24%PV F2 MAP-20%PB F2	Expansion RAS (%) à 28 jours	0.05063 0.03954
MAP-20%PV F2 MAP-12%PB F2	RCR (%) à 90 jours dans l'eau pour test à 400 °C	96% mais 5% supérieur au témoin 98% mais 7% supérieur au témoin

IV.13. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était l'étude de l'effet de la substitution du ciment par 8%, 12%, 16%, 20% et 24% de la poudre de verre (PV) et de 4%, 8%, 12%, 16% et 20% de la poudre de brique (PB) ayant trois finesses différentes (3300 cm^2/g , 4400 cm^2/g et6000 cm^2/g) sur l'ouvrabilité du mortier, la résistance en compression et à la flexion à jeune âge et à long terme, l'absorption d'eau par immersion totale, la porosité, le retrait, la réaction alcali silice (RAS), la résistance à haute température et la microstructure. A la lumière des résultats obtenus, les principales conclusions à tirer, sont les suivantes :

- L'effet pouzzolanique de la PV et la PB se voit clairement sur le développement de la résistance mécanique surtout avec l'augmentation de la finesse.

- L'incorporation de PV et PB réduit la résistance à la compression dès le plus jeune âge mais en revanche l'ajout de de PV et PB dans les mélanges MAP a eu un effet positif sur la résistance à la compression à long terme. À des âges plus avancés, les MAP-PV et MAP-PB ayant une finesse plus élevée (4400 et 6000 cm^2/g) ont tendance à avoir des résistances à la compression plus élevée pour une substitution de 12% PV et 8% PB.

- L'effet de la PV et PB sur la résistance à la flexion des MAP était fondamentalement cohérent avec le comportement de la résistance à la compression.

- Les résistances à la flexion de tous les mélanges avec la PV de 7 à 400 jours avec F3 (6000 cm^2/g) sont supérieures à celle du contrôle.

- L'absorption d'eau par immersion totale a diminué avec l'introduction de la PV est ceci pour les trois finesses et pour les deux modes de conservation (eau et air). Pour les mélanges avec PB on voit une augmentation de l'absorption avec l'augmentation de la finesse pour les mélanges conservés à l'air libre, c'est peut-être la cause que les mélanges avec F2 (4400 cm^2/g) donnent de bonnes résistances par rapport à ceux avec F3 (6000 cm^2/g) à long terme, alors que pour les mélanges conservés dans l'eau on voit que l'absorption diminue avec l'âge et avec la finesse.

- La porosité diminue pour les deux mélanges MAP-PV et MAP-PB et pour les deux modes de conservations (eau et air) et ceci avec l'augmentation de la finesse qui rend la matrice cimentaire plus dense à cause de l'effet de remplissage des pores par le gel C-S-H secondaire généré qui provoque la densification de la microstructure des MAP.

- Le retrait de séchage des MAP-PV est réduit de manière significative avec l'ajout de PV et aussi avec l'augmentation de la finesse, le rétrécissement des MAP-PVF3 (6000 cm^2/g) est le plus faible. Par contre le retrait de séchage des MAP-PB augmente avec l'augmentation de la teneur en PB et avec l'augmentation de la finesse, mais il reste toujours inférieur au MAP témoin, sauf pour les mélanges 16% PB F3 et 20% PB F3 qui entrainent un retrait plus important.

- L'incorporation de 24% PV et 20% PB avec une finesse de 4400 cm^2/g comme ajout cimentaire pourrait diminuer considérablement l'expansion RAS.

- Les MAP contenant des PV et PB présentent de meilleures performances en termes de résistance à haute température et les échantillons durcis à l'eau avaient des résistances résiduelles plus élevées. L'inclusion de 16% PV et 12% PB contribue à l'amélioration de la résistance à la compression résiduelle.

- Une réduction de la porosité pour les mélanges avec 20%PV et 20%PB à 90 jours est observée et cela dûe à la surface spécifique plus élevée que le ciment qui raffine la structure poreuse des MAP-PV et MAP-PB conduisant à une diminution de l' absorption et à une augmentation de la résistance.

- On peut conclure que les mélanges 12%PV et 8%PB avec une finesse F2 (4400 cm^2/g) sont les optimums vus qu'ils sont les moins poreux et les plus résistants.

CHAPITRE V

EFFET DE COMPOSITE TERNAIRE (CIMENT+POUDRE DE VERRE+POUDRE DE BRIQUE) SUR LE COMPORTEMENT DES MAP À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI

CHAPITRE V

EFFET DE LA COMPOSITION TERNAIRE (CIMENT+POUDRE DE VERRE+POUDRE DE BRIQUE) SUR LE COMPORTEMENT DES MAP À L'ÉTAT FRAIS ET DURCI

V.1.Introduction

Après optimisation des mortiers binaires (Ciment+PV et Ciment+PB) vue au chapitre IV, on examine dans le present chapitre l'effet combiné de PV et PB sur le mortier ternaire (80% ciment+12% PV + 8%PB) avec une finesse F2=4400 cm^2 /g sur les propriétés mécaniques et la durabilité des MAP et on essaye de comparer nos résultats avec ceux d'autres chercheurs existant dans la littérature.
Plus en detail, nous présenterons l'effet combiné de la poudre de verre et la poudre de brique sur l'ouvrabilité des MAP tels que l'étalement au mini-cône et le temps d'écoulement au V-funnel ainsi que l'influence de ces additions sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression et la résistance à la flexion) des MAP. Le chapitre se termine par des essais de durabilité tels que l'absorption d'eau par immersion totale, la porosité, le retrait, la réaction alcali-silice (RAS), la résistance à haute température et la microstructure des mortiers autoplaçants étudiés.

V.2.Essai d'étalement au mini-cône

Les résultats de l'étalement des mortiers avec 12%PV+8%PB, sont représentés sur la figure V.1 qui montre que les valeurs de l'étalement étaient comprises entre 270 et 330 mm, dans l'intervalle recommandé par Domone et Jin. Elles représenteront donc la capacité d'écoulement du MAP sans ségrégation et ressuage. Cependant, les résultats obtenus montrent une amélioration de l'étalement par rapport au MAP témoin avec une augmentation de la fluidité, grâce à l'effet synergique de PV et PB. L'utilisation de ces deux matériaux en combinaison a été trouvée bénéfique, car elle permet d'atténuer l'effet négatif de l'utilisation de la PB avec le ciment ordinaire sur la déformabilité des MAP.

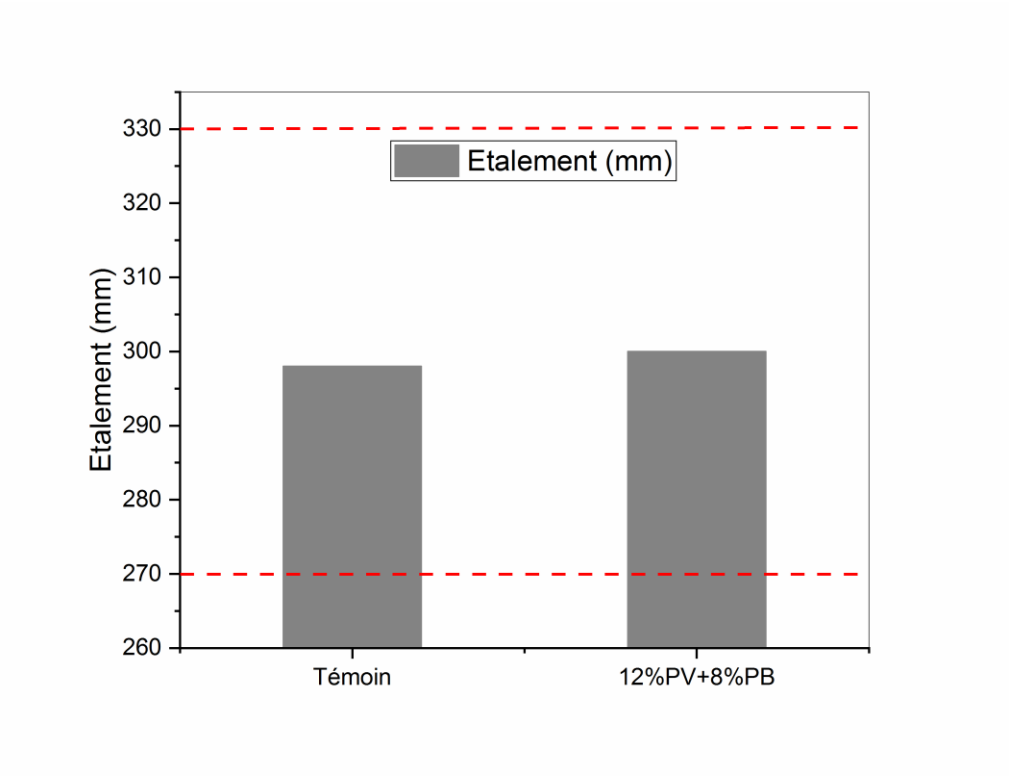


Figure V.1. Variation de l'étalement des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.3. Essai d'écoulement au V-funnel

La figure V.2 montre la variation du temps d'écoulement par le mini V-funnel pour les MAP avec 12%PV et 8%PB. D'après la figure on remarque que la capacité de passage pour tous les MAP donne des temps d'écoulement dans la plage recommandée de 2 à 10 secs, par l'EFNARC [140]. Ces résultats montrent que la combinaison de PV et PB a réduit le temps d'écoulement et par conséquent de la viscosité des mélanges.

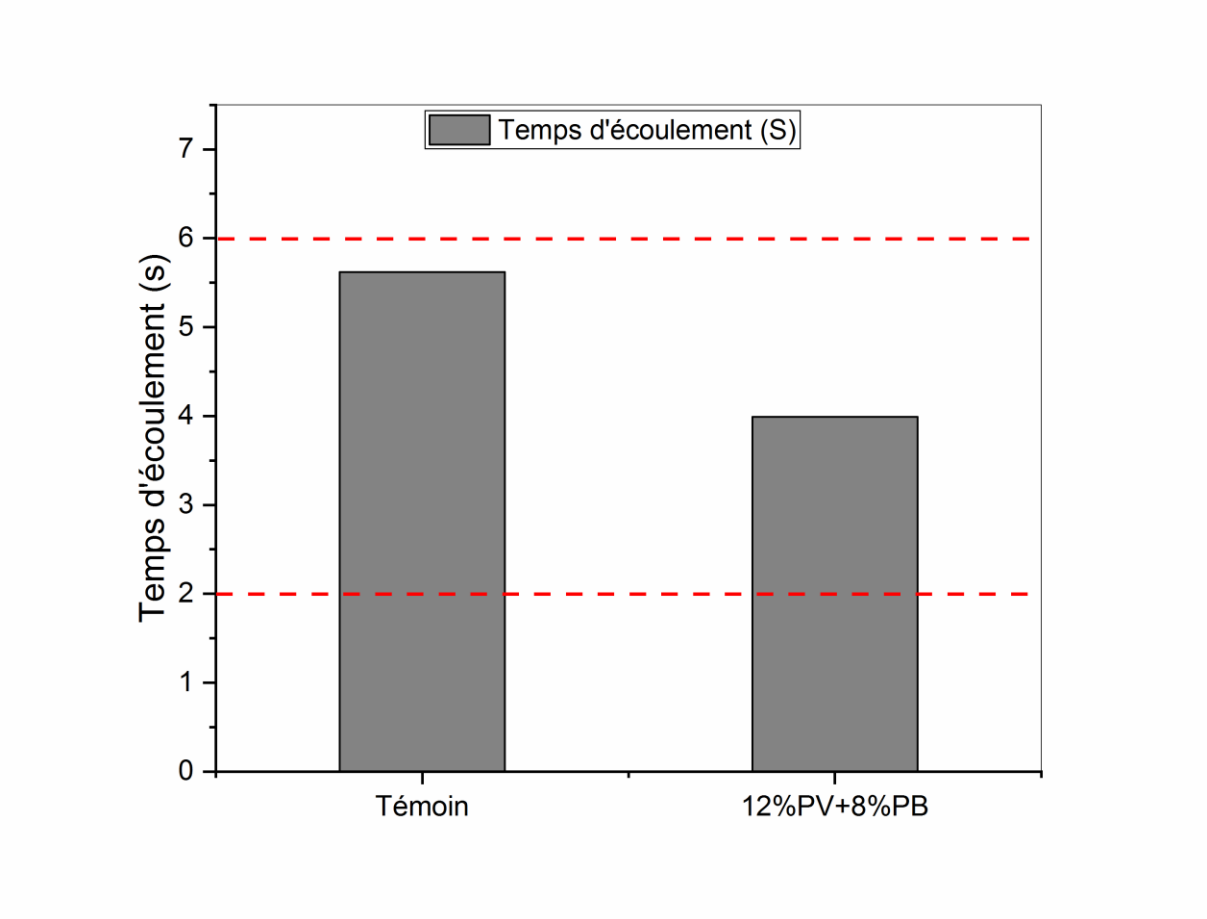


Figure V.2. Variation du temps d'écoulement des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.4. Résistance à la compression

V.4.1. Résistance à la compression des MAP avec 12%PV+8%PB (conservation dans l'eau et à l'air libre)

Les résultats de la résistance à la compression à différents âges (7, 14, 28 ,56 et 90 jours) pour les MAP avec 12%PV+8%PB conservés dans l'eau et à l'air libre sont représentés dans les figures V.3 (a et b). Au regard dans les figures et en comparaison au temoin, on constate une diminution de la résistance à la compression à 7, 14, 28 et 56 jours de cure pour les MAP avec 12%PV+8%PB pour les deux modes de conservation (eau et air). En revanche, l'amélioration de la résistance est observée à partir de l'âge de 90 jours. On note une diminution de l'ordre de 27%, 13% ,11% et 10%, pour les MAP avec 12%PV+8%PB conservés dans l'eau, et de 7%,1%,11% et 2% (conservation à l'air) à 7, 14, 28 et 56 jours respectivement, par rapport au mélange témoin. Comparé au témoin la résistance à la compression à l'âge de 90 jours des MAP avec 12%PV+8%PB augmente de 68 MPa à 70 MPa (pour la conservaion dans l'eau) et de 57 MPa à 58 MPa (pour la conservation à l'air libre).

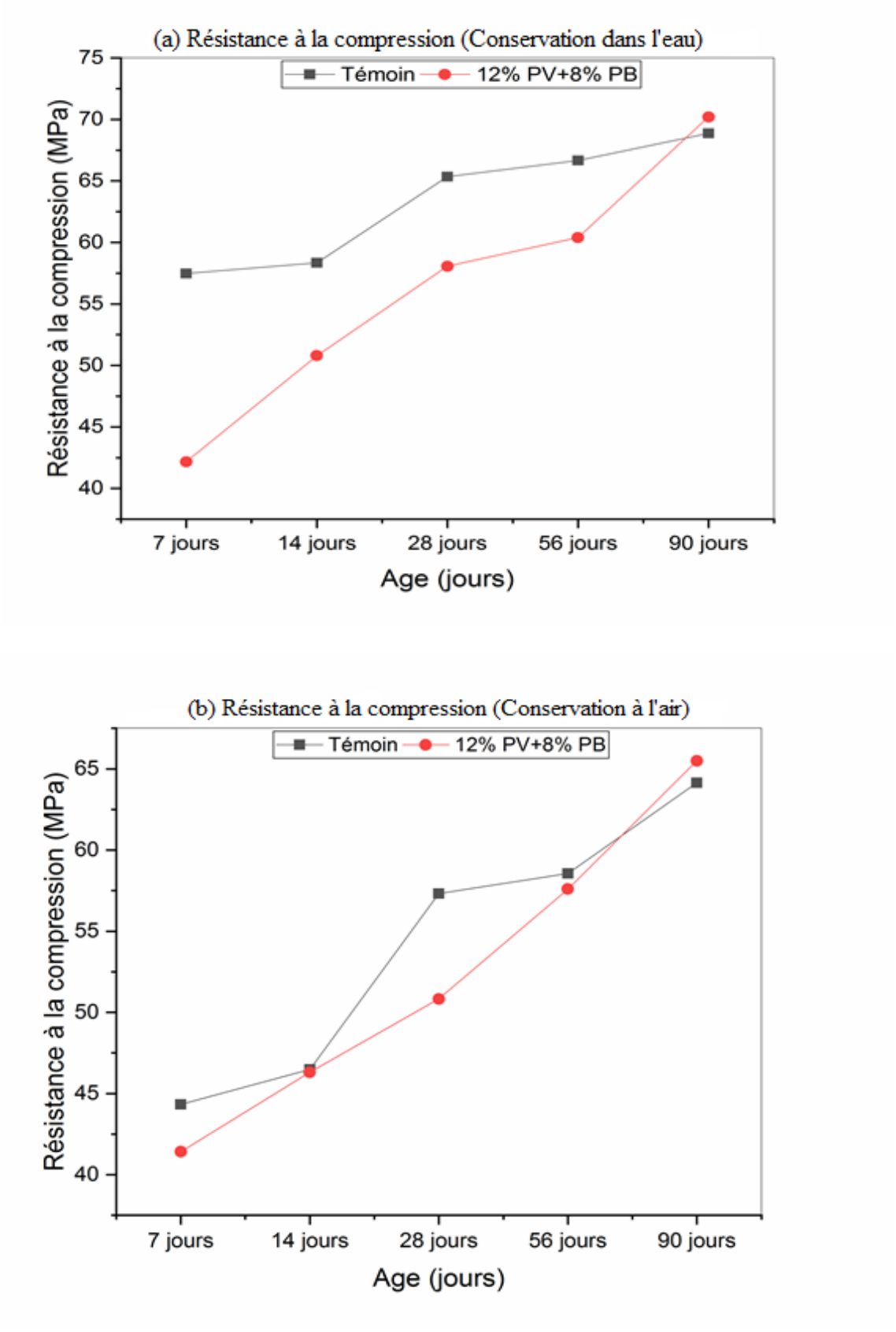


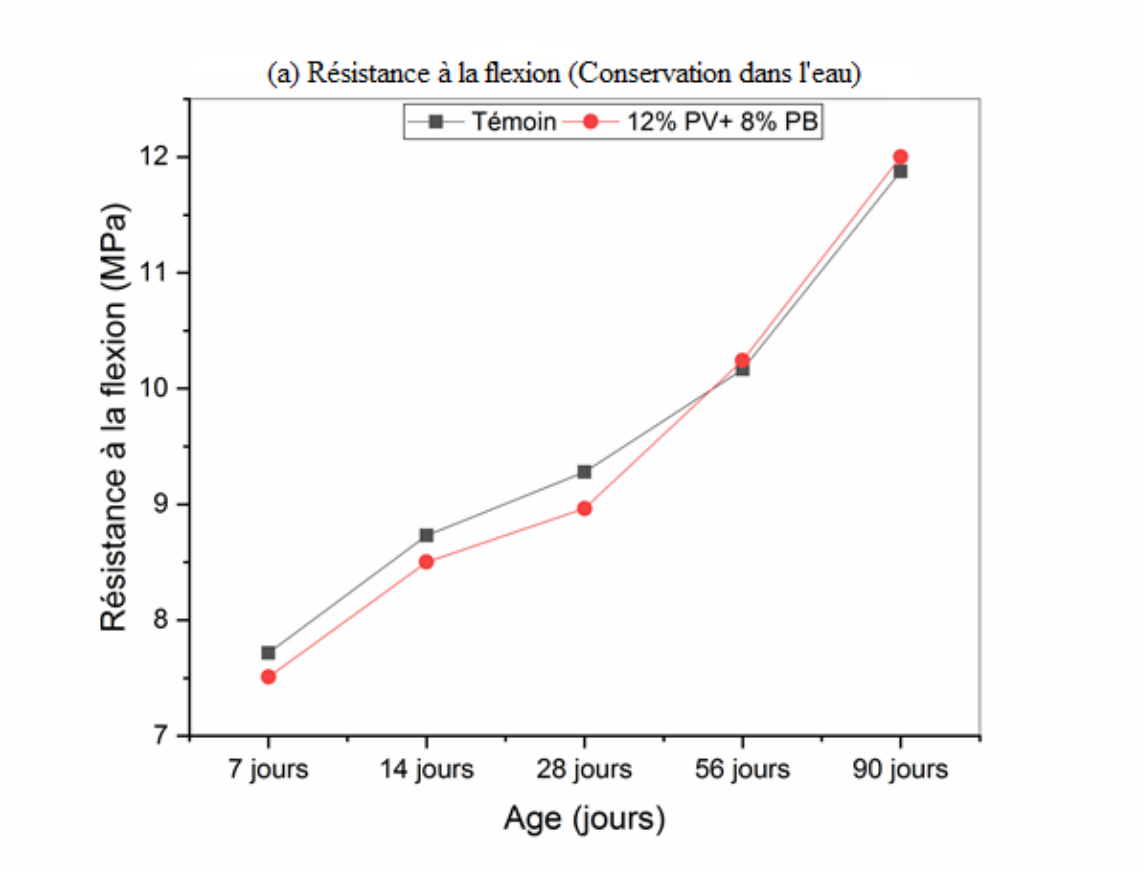
Figure V.3. Résistance à la compression des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.5. Résistance à la flexion

V.5.1. Résistance à la flexion des MAP avec 12%PV+8%PB (conservation dans l'eau et à l'air libre)

L'évolution de résistance à la flexion des MAP avec 12%PV+8%PB à 7, 14, 28, 56 et 90 jours conservés dans l'eau et à l'air libre sont représentés sur les figures V. 4 (a et b).

D'après ces figures, on constate que le MAP avec 12%PV+8%PB donne une résistance à la flexion faible à 7, 14 et 28 jours pour les deux modes de conservation. La diminution de la résistance est de l'ordre de 2,68%, 2,61% et 3,38% à 7, 14 et 28 jours pour les échantillons conservés dans l'eau) et de 5,73% ; 3,97% ; 3,22% et 3,80% à 7, 14, 28 et 56 jours pour ceux conservés à l'air libre, mais une amélioration est observée à long terme où, par rapport au MAP témoin, des gains de résistance à la flexion de 2% et 1% sont observés pour le MAP avec 12%PV+8%PB à 90 jours conservé dans l'eau et à l'air libre respectivement. L'amélioration peut être interpréter par la présence de plus des vides dans le mortier, qui est rempli par le gel CSH résultant de la réaction pouzzolanique du PV et PB.



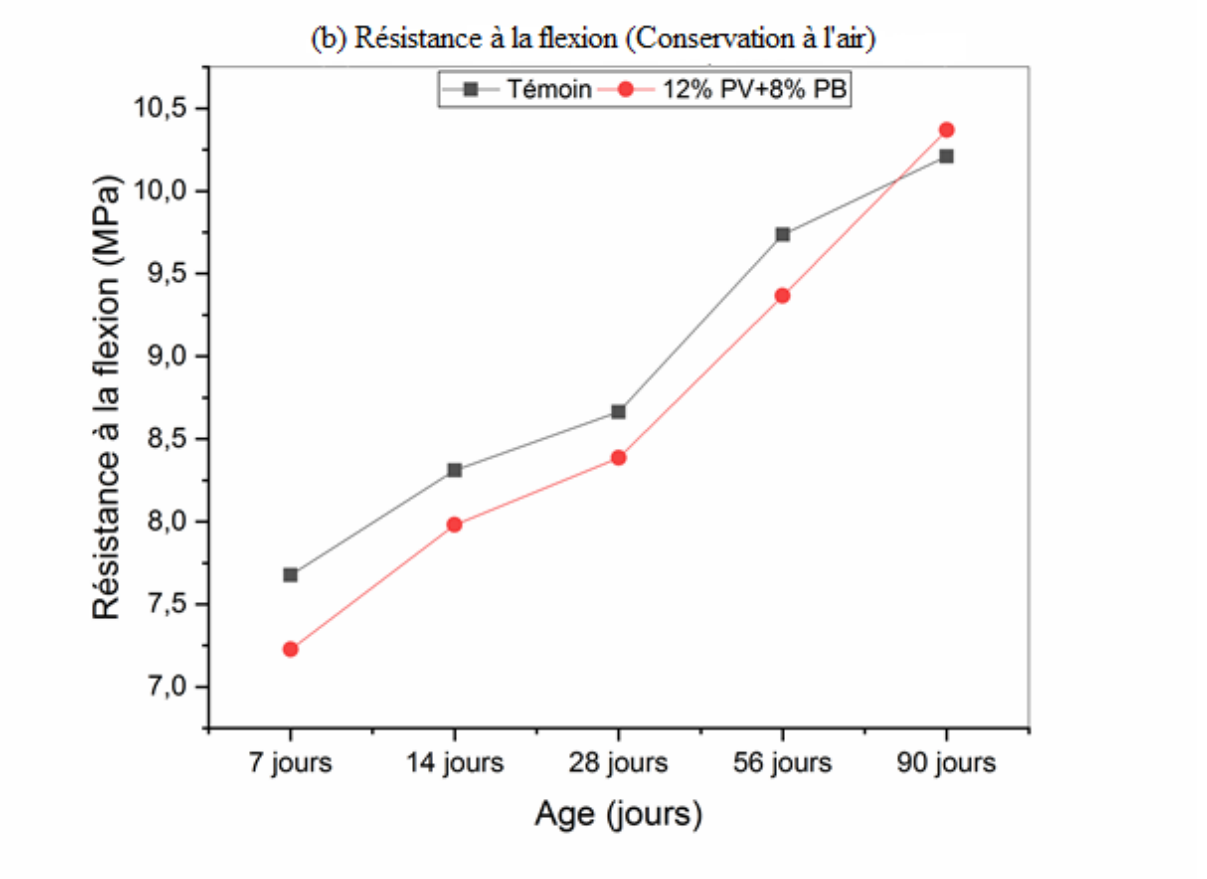


Figure V.4. Résistance à la flexion des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.6. Absorption d'eau par immersion totale

Les figures V.5 (a et b) présentent l'absorption d'eau par immersion totale des MAP avec 12%PV+8%PB en fonction du temps à 28 et 90 jours. Les valeurs trouvées montrent une diminution de l'absorption avec l'âge. La diminution est importante pour les mélanges conservés dans l'eau par rapport aux mélanges conserver à l'air libre. D'après ces figures on observe que le mélange témoin est celui qui a le taux d'absorption le plus grand, alors que le taux d'absorption de mélange 12%PV+8%PB est plus petit.

La réduction d'absorption est plus visible avec l'âge qui est importante à 90 jours. Elle est de l'ordre de 8% et 15% et de 6% et 10% pour le MAP avec 12%PV+8%PB conservés dans l'eau et à l'air libre à 28 et 90 jours respectivement.

Cette réduction reflète bien une structure poreuse plus raffinée des mortiers, qui deviennent ainsi plus compact, plus résistant et plus étanche à l'eau.

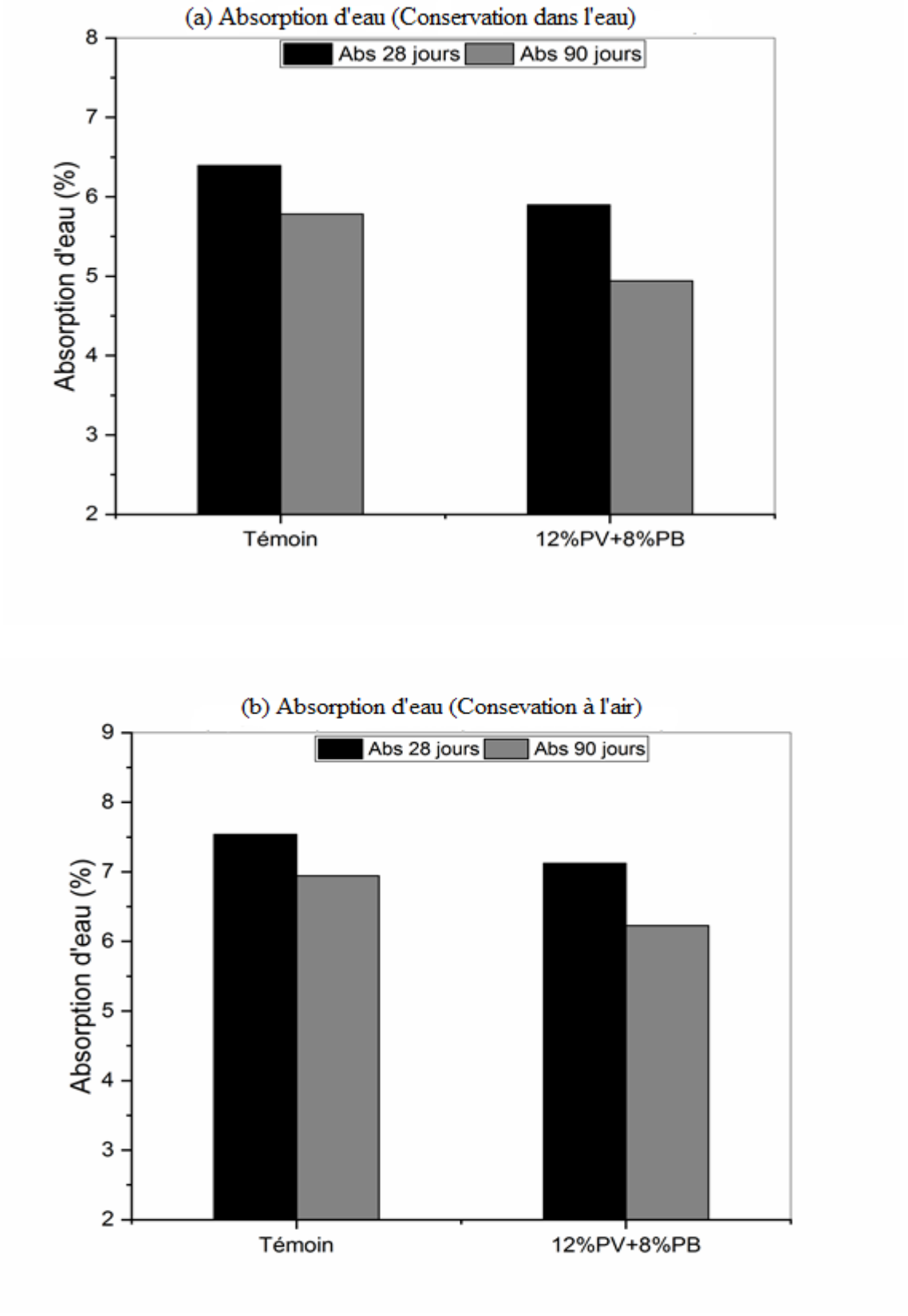
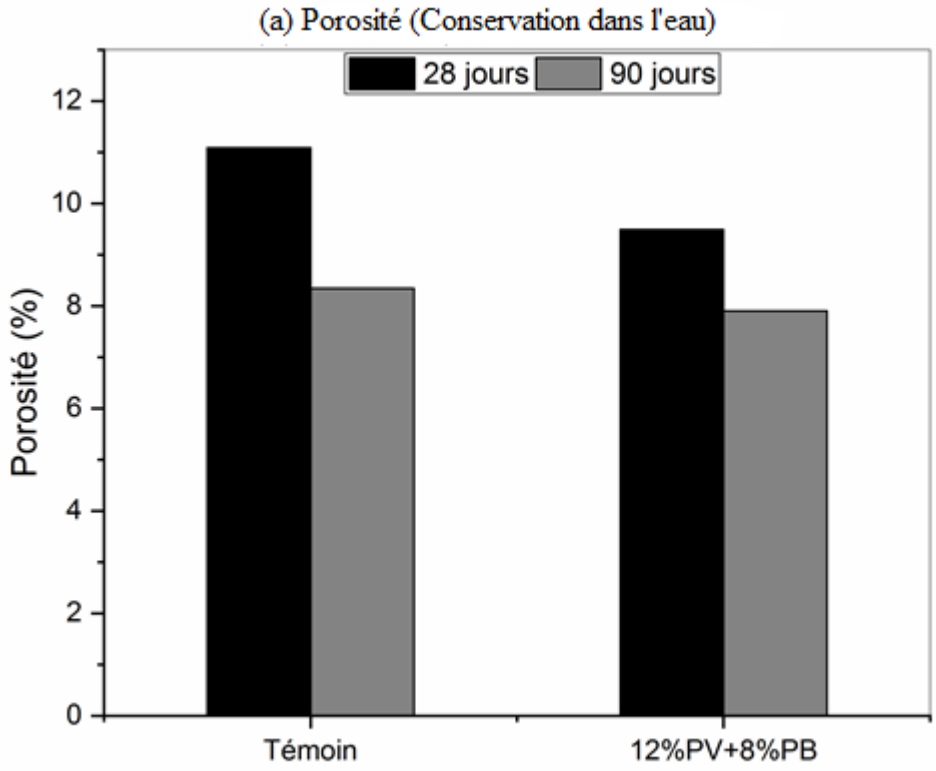


Figure V.5. Absorption d'eau des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.7. Porosité

Les valeurs de la porosité accessible à l'eau en fonction de l'âge de durcissement 28 et 90 jours des MAP avec 12%PV+8%PB conservés dans l'eau et à l'air libre sont présentées sur les figures V.6 (a et b).

De ces figures, on remarque que l'effet combiné de PV et PB provoque une diminution dans la porosité du MAP et ceci quel que soit le mode de conservation à l'eau ou l'air libre. Les plus faibles porosités sont observées pour les MAP conservés dans l'eau à 90 jours. Une diminution de 14% et 5% est enregistrée pour le MAP avec 12%PV+8%PB conservés dans l'eau à 28 et 90 jours respectivement, et de 1% et 14% à 28 et 90 jours respectivement pour le MAP avec 12%PV+8%PB conservé à l'air libre par rapport au MAP témoin. Cette réduction de la porosité est due au remplissage du volume des vides dans le mortier par les particules plus fines de PV et PB ainsi que les produits d'hydratation résultant de la réaction pouzzolanique.



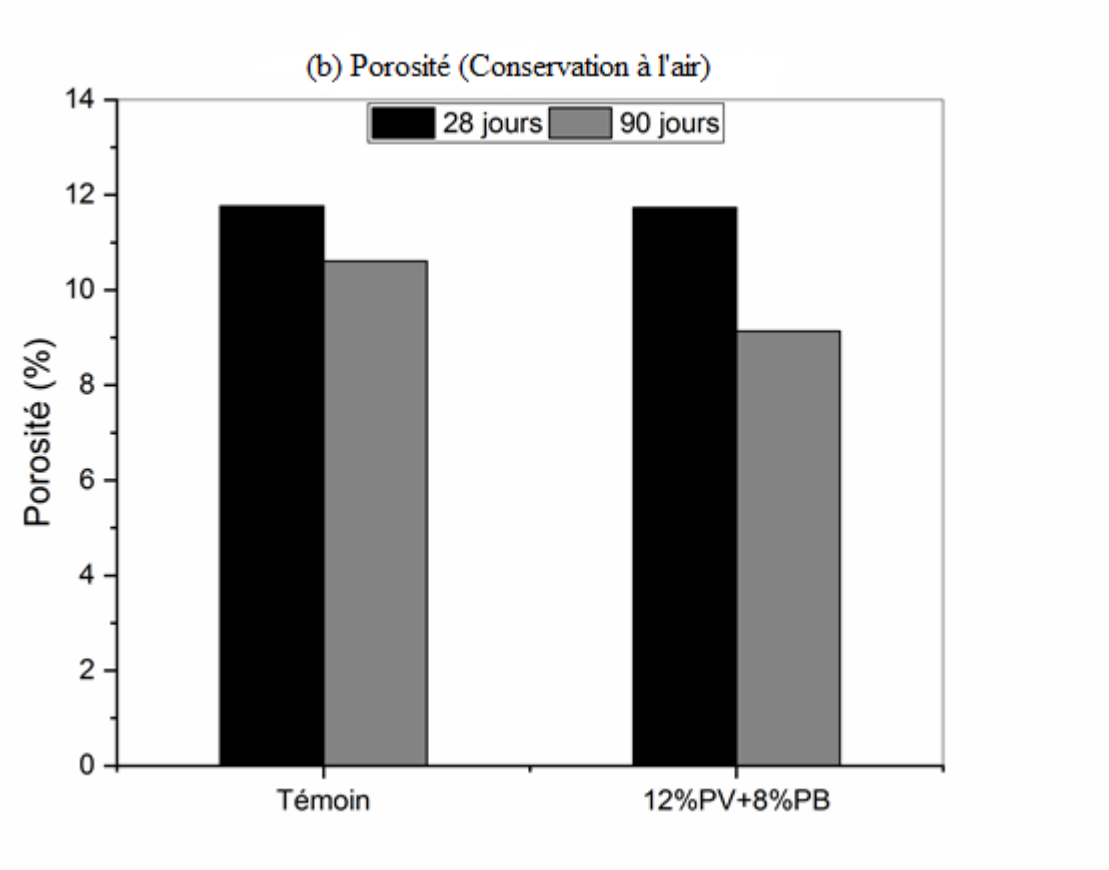


Figure V.6. Porosité des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.8. Retrait

La figure V.7 montre l'évolution du retrait des échantillons des MAP avec 12%PV+8%PB en fonction du temps allant jusqu'à 56jours. On remarque que l'évolution du retrait et très rapide aux premiers jours. Ça peut être attribué à une forte consommation d'eau du au séchage et à l'hydratation du ciment. Les valeurs de retrait de séchage étaient inférieures à 0,075% qui est la limite fixée par la norme australienne.

D'après les résultats, on peut constater que le retrait de séchage des MAP avec 12%PV+8%PB est plus faible en comparaison avec celui du mortier témoin.
La diminution du retrait des MAP avec 12%PV+8%PB est d'environ 22%,11%, 3% et 2% par rapport au MAP témoin à 7, 14, 28 et 56 jours respectivement.
L'inclusion de PV et PB ensemble a réduit le retrait de séchage par la réduction de la quantité d'eau évaporable en raison d'un taux plus lent d'hydratation des poudres de verre et de la brique, ces derniers jouent un rôle positif dans le retrait du mortier au cours des 4 premiers jours.

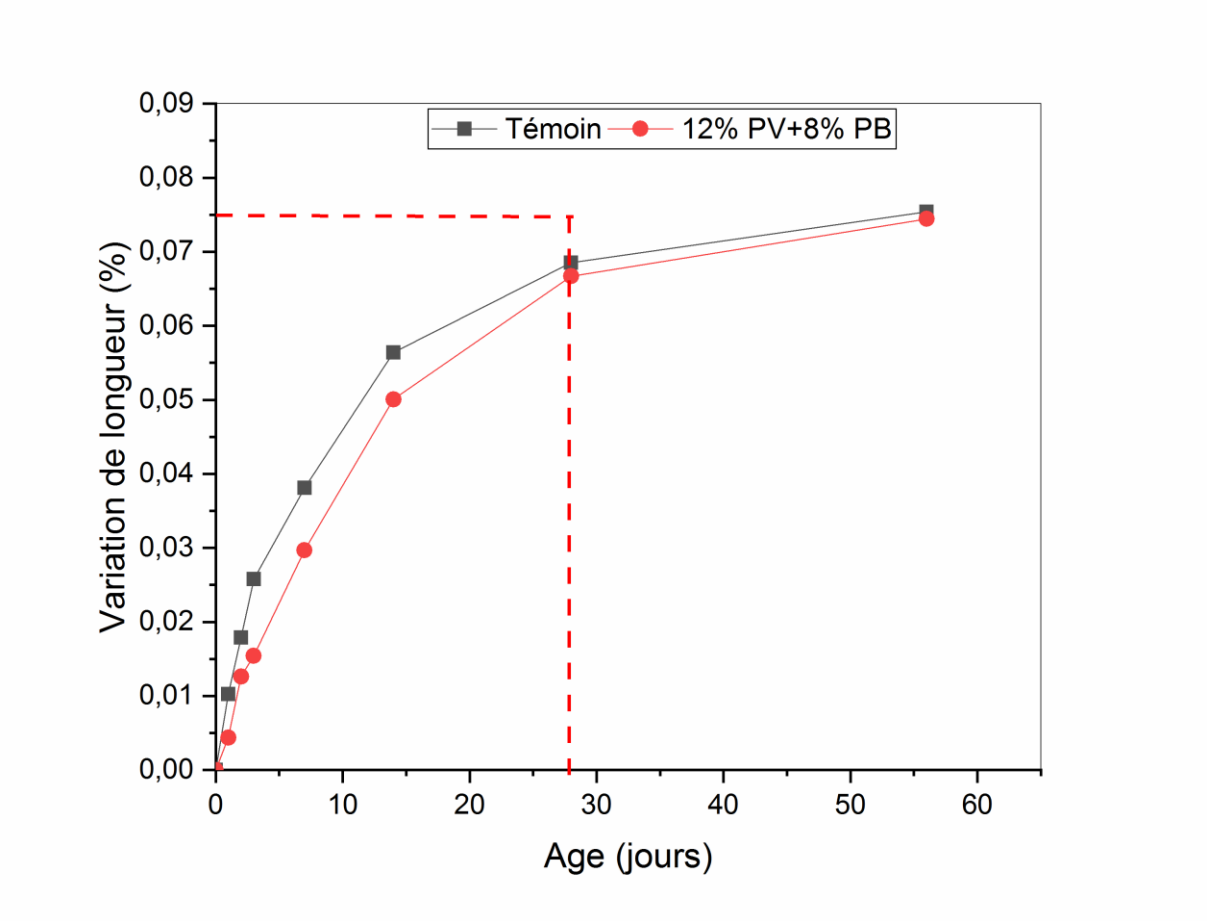


Figure V.7. Retrait des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.9. Réaction alcali-silice (RAS)

La figure V.8 présente la variation de la réaction alcali silice (RAS) pour les MAP témoin et avec 12%PV+8%PB en fonction de la durée d'immersion dans la solution de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à 1, 4, 7, 14 et 28 jours.

On constate une augmentation de l'expansion des deux mélanges jusqu'à 28 jours. La valeur limite atteinte à 28j est de 0,110 % pour le MAP témoin. Les autres rendements variaient de 0,040% à 0,055% à 4 et 7 jours et de 0,088% à 14 jours respectivement pour le MAP témoin et de 0,022% à 0,037 à 4 et 7 jours et de 0,074% à 14 jours respectivement pour le MAP avec 12%PV+8%PB et étaient quasi stables après 14 jours. Au cas où le mélange est en dessous du taux d'expansion de 0,1% au bout de 14 jours, la norme indique le comportement inoffensif du mortier. Si les valeurs d'expansion ne dépassent pas 0,1% après 28 jours, il est toujours possible de déclarer le mélange inoffensif.

Selon la norme ASTM C 1260 [246], les deux mélanges (témoin et avec 12%PV+8%PB) ont montré que la limite de 0,1 % était respectée jusqu'aux 14 jours ; cependant, à 28 jours le MAP témoin a présenté des résultats légèrement plus élevés de 0,1% mais on peut le considérer toujours comme mélange inoffensif. Le MAP avec 12%PV+8%PB présente des résultats très équilibrés et stables en particulier par rapport à ceux du MAP témoin.

La diminution d'expansion pourrait être due à la réaction pouzzolanique de PV et PB combinées, qui consomment le SiO2 et CaO dans la réaction d'hydratation.

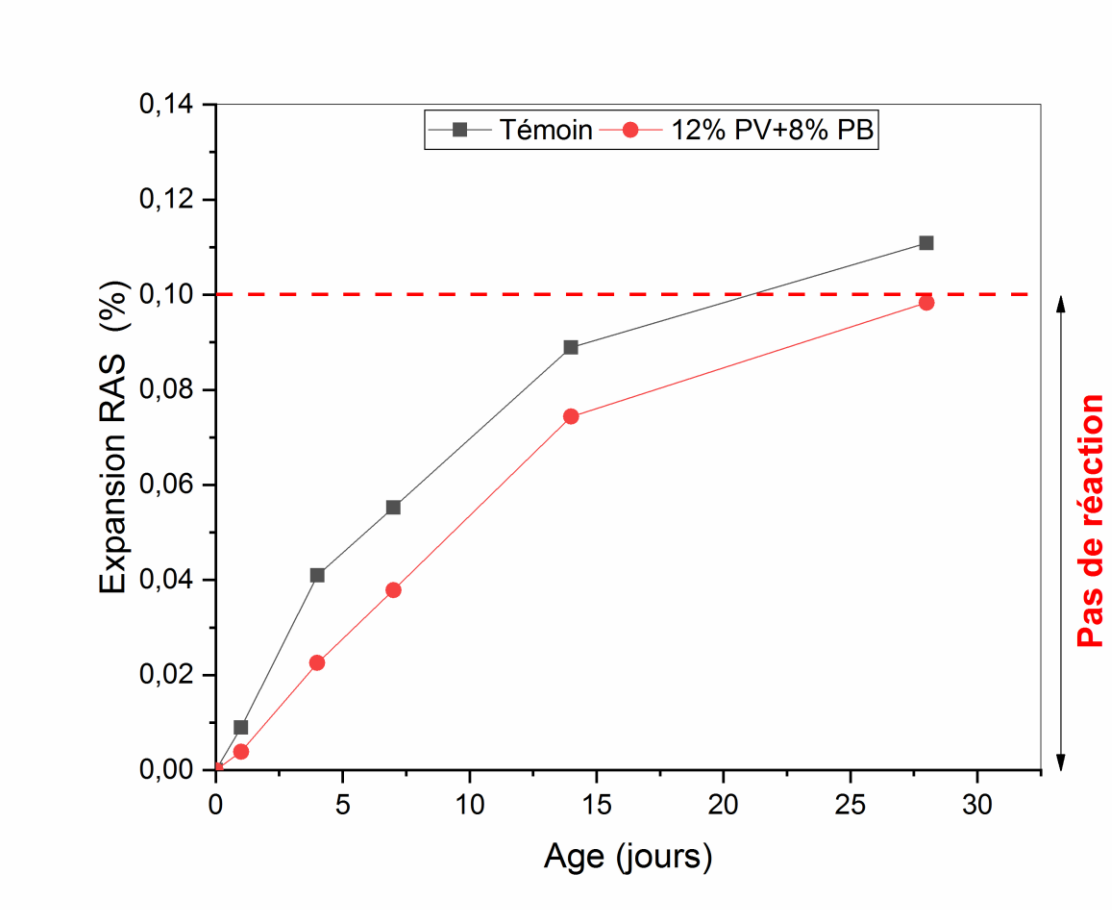


Figure V.8. Expansion RAS des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.10. Résistance à haute température

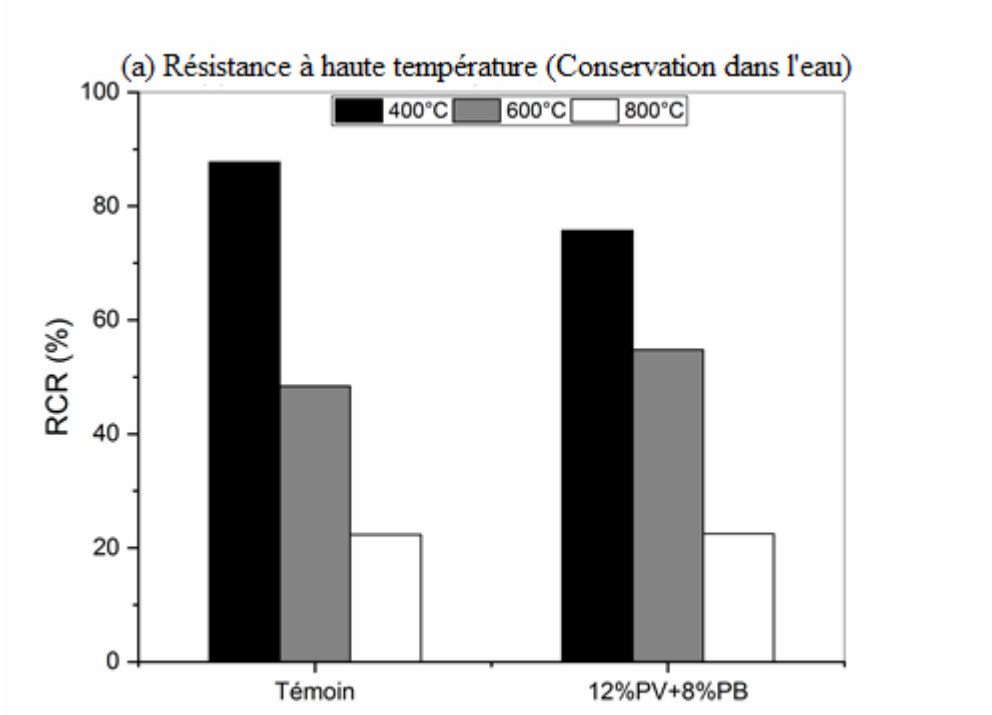
Les résultats de la résistance à la compression résiduelle (RCR) des MAP avec 12%PV+8%PB durcis à l'eau et à l'air libre après avoir été soumis à des températures élevées sont présentés à la figure V.9 (a et b).

On peut voir que la perte de résistance de MAP témoin et du MAP avec 12%PV+8%PB diminue avec l'augmentation des températures. À 400 °C, la résistance résiduelle varie de 75 % à 87 % et de 66 % à 78 % de la résistance initiale (valeurs des échantillons non chauffés) pour les échantillons durcis à l'eau et à l'air, respectivement.

À mesure que la température de chauffage augmente, la résistance diminue considérablement. La diminution de la résistance des échantillons durcis à l'eau à l'air pour une température de chauffe de 600 °C est d'environ 48 à 54 % et 33 à 42 %, respectivement par rapport aux valeurs initiales.

On sait que le taux de décomposition du C-S-H est faible lorsque la température est < 600°C, mais augmente considérablement lorsque la température augmente encore jusqu'à 800 °C [295]. Par conséquent, lorsque la température atteint 800°C, les principaux produits d'hydratation de la pâte de ciment hydraté entre autres, le C-S-H se sont considérablement décomposés et ont entraîné une importante baisse de la résistance. Cela a révélé que la décomposition du C-S-H a un effet considérable sur la perte de résistance du béton, ce qui à son tour, a entraîné une perte de résistance de 75 % par rapport à les valeurs de résistance initiales (éprouvettes non chauffées) [291].

Pour 800 °C, la résistance des échantillons de MAP témoin et avec 12%PV+8%PB durcis à l'eau et à l'air a été réduite à 15,4-15,8 MPa et 5-14,1 MPa. Cela indique que le changement des propriétés physiques et mécaniques des poudres de verre et de la brique lors de son seuil de fusion à environ 700 °C n'a pas d'impact significatif sur la dégradation de la résistance du béton [291].
En comparant les échantillons durcis à l'eau et à l'air, en général, la résistance résiduelle des échantillons durcis à l'eau sont restés supérieurs à ceux des échantillons durcis à l'air pour toutes les températures testées. L'utilisation de PV et PB en combinaison dans la production de MAP présente des avantages significatifs en terme de durabilité et de de résistance au feu.



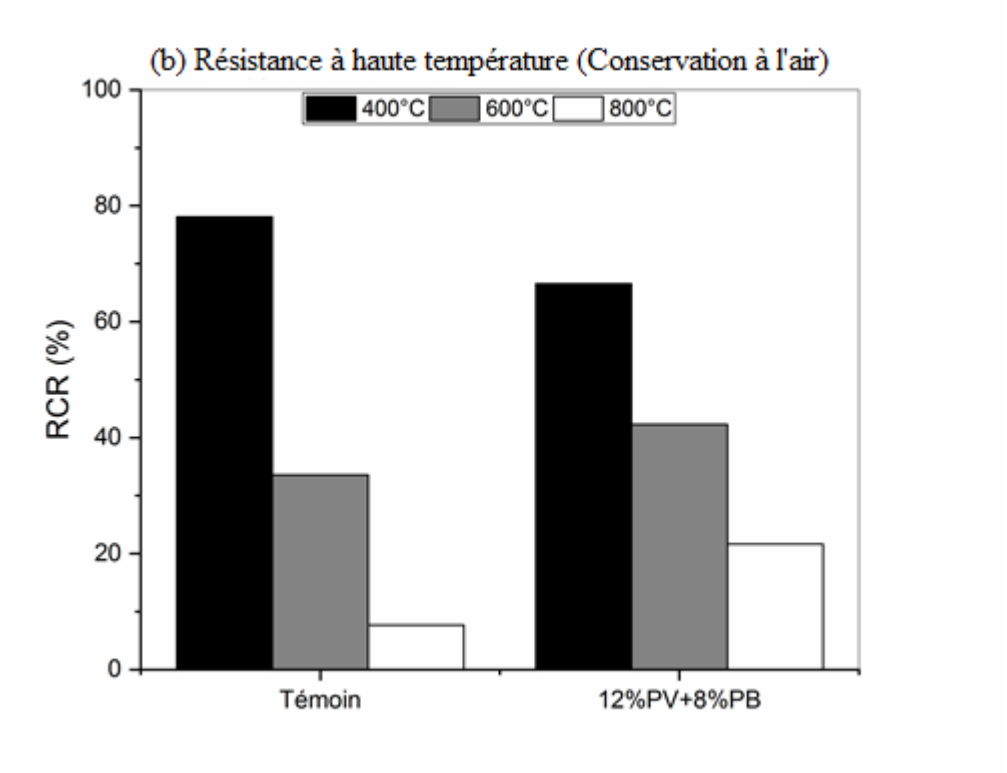


Figure V.9. Résistance à haute température des MAP avec 12%PV+8%PB.

V.11. Analyse microstructurale

Les figures V.10 et V.11 (a, b, c) montrent des images en microscopie électronique à balayage (MEB) de MAP témoin et MAP avec 12%PV+8%PB après 90 jours de cure. La microstructure de MAP avec 12%PV+8%PB est légèrement plus dense que celle de MAP témoin. En raison de l'effet de remplissage des poudres de verre et de la brique, l'ajout de PV et PB de grande finesse remplit les vides et les pores dans les matériaux cimentaires, et le réseau poreux est affiné [138].
De plus, le degré d'hydratation de mortier avec 12%PV+8%PB est supérieur à celui de mortier témoin, une masse de substances non hydratées est observée dans le MAP témoin.

Les produits d'hydratation de MAP témoin sont principalement des pics d'hydroxyde de calcium CH et d'ettringite, tandis que la quantité de gel CSH est faible. Un gel CSH, du Ca (OH)2 en forme de plaque et des cristaux d'ettringite en forme d'aiguille ont été observés pour le MAP avec 12%PV+8%PB. Ces produits d'hydratation se chevauchent pour former une structure dense. Par rapport au MAP témoin, le MAP avec 12%PV+8%PB contenait plus de gel CSH cela indique que PV et PB ont une activité pouzzolanique supérieure avec un effet comblant.

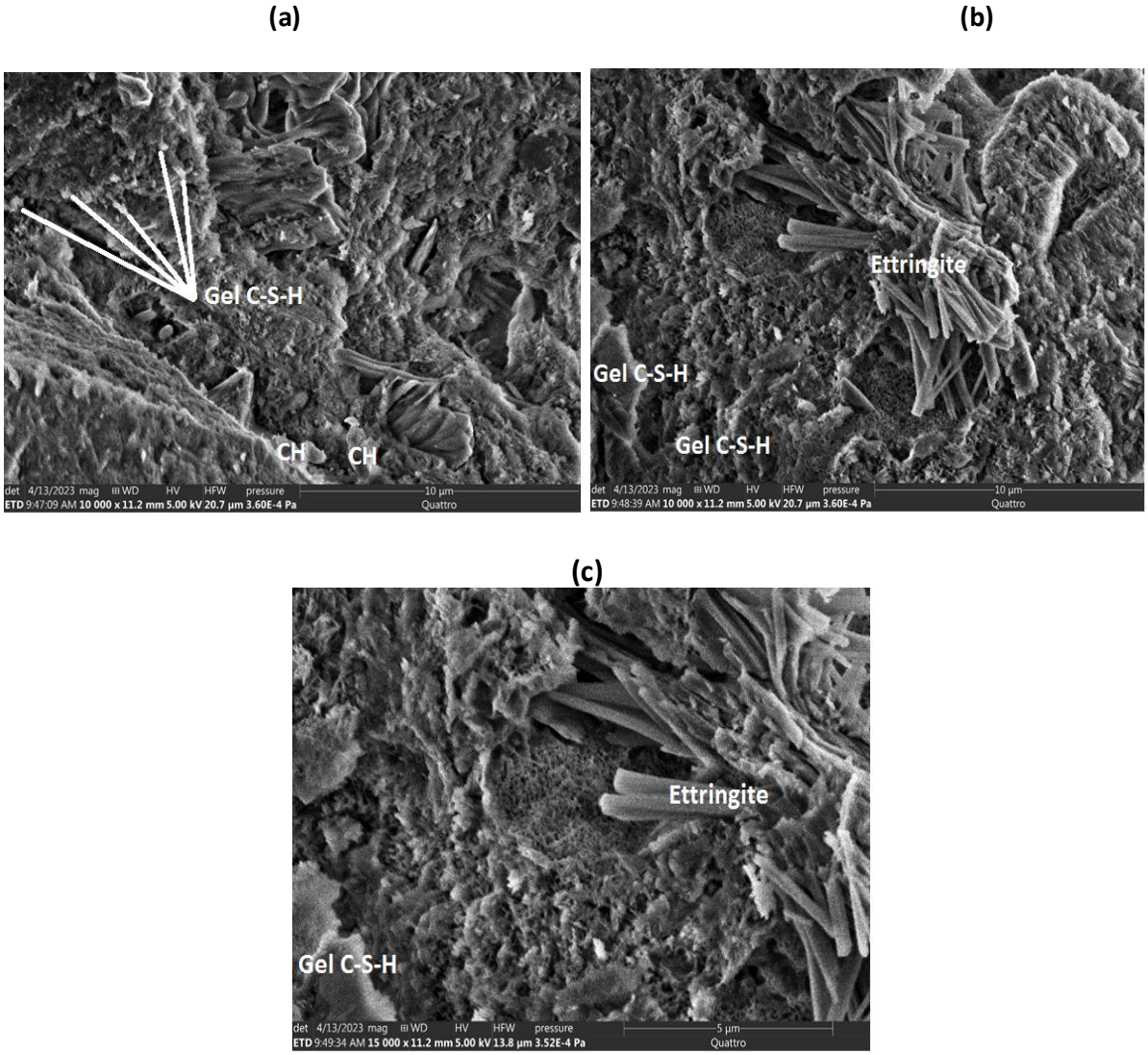
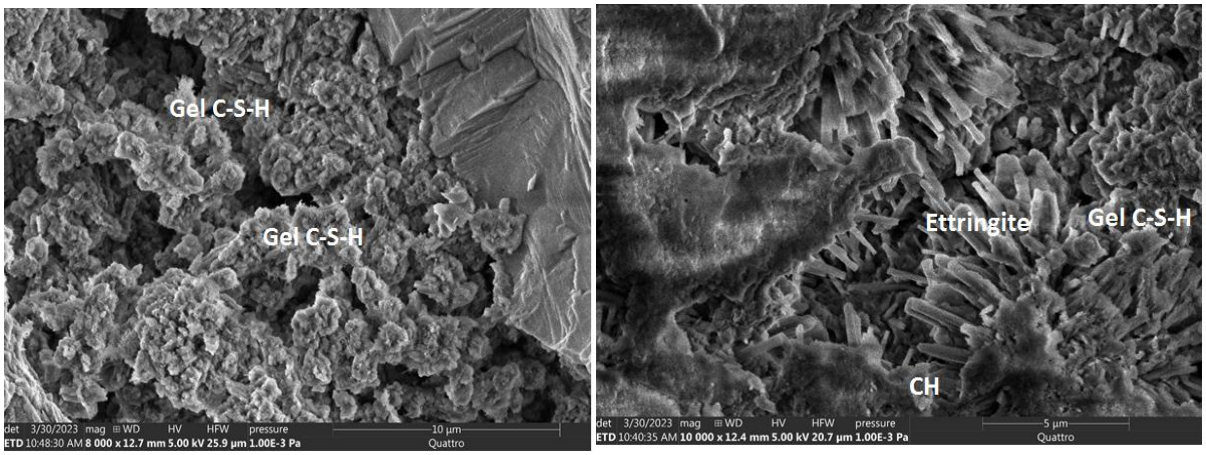


Figure V.10. Examen au MEB du MAP Témoin (a,b,c).

(a) **(b)**



(c)

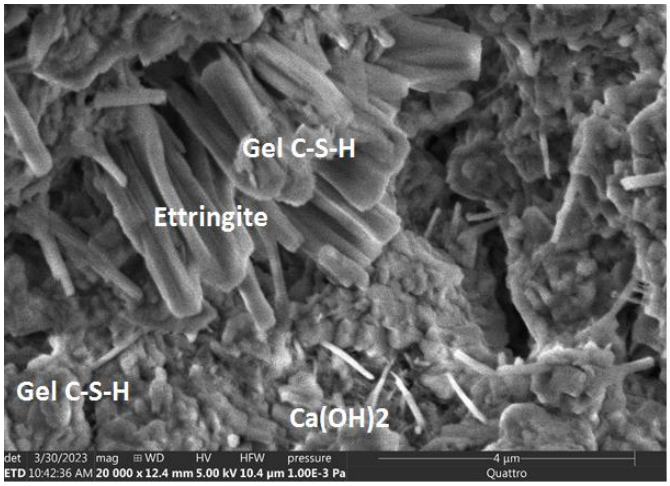


Figure V.11. Examen au MEB du MAP avec 12%PV+8%PB (a,b,c).

V.12. Conclusion

Les essais réalisés dans ce chapitre visent à évaluer l'influence des poudres de verre et de la brique cuite en combinaison comme matériaux cimentaires supplémentaires (12%PV+8%PB+80%ciment) sur les propriétés frais (diamètre d'étalement mini-cône et le temps d'écoulement V-funnel), la résistance à la compression et à la flexion, l'absorption par immersion totale, porosité, retrait, réaction alcali-silice (RAS), résistance au feu et microstructure des mortiers autoplaçants (MAP).

Les résultats issus de cette étude expérimentale ont permis de conclure que :

- L'ouvrabilité mesurée par l'étalement et le temps d'écoulement de MAP avec 12%PV+8%PB présente une amélioration par rapport au MAP témoin. Ce qui indique une augmentation de fluidité, grâce à l'effet synergique de PV et PB.

- L'incorporation de PV et PB en combinaison réduit les caractéristiques mécaniques à savoir la résistance à la compression, à la flexion à jeune âge. Tandis qu'à long terme, un effet positif sur la résistance à la compression et à la flexion est observé. À 90 jours les MAP avec 12%PV+8MPB ont tendance à avoir des résistances à la compression et à la flexion plus élevées que le MAP témoin.
- La résistance à la compression initiale des MAP durcis à l'eau est relativement plus élevée que les MAP correspondants durcis à l'air. Ceci est attribué à la poursuite de l'hydratation du ciment en présence de l'eau.

- La poudre de verre et de la brique réduisent la porosité et l'absorption des MAP parallèlement à l'augmentation de la durée de cure, qui se traduit par une densification de la matrice cimentaire due à l'activité hydraulique ou pouzzolanique de ces deux additions.

- En termes de durabilité une diminution de retrait et du volume des éléments expansifs issus de RAS,est observé en présence de PV et la PB.
- Lors d'une exposition à des températures élevées des échantillons, les MAP avec PV et la PB, démontrent des résistances résiduelles améliorées par rapport au MAP témoin

- Grâce à l'effet synergique de la combinaison de PV et la PB dans les mélanges des MAP, la composition avec 20% de substitution du ciment par ces ajouts offre un avantage économique et technique en termes de réduction de coût des MAP par la réduction de la quantité de ciment.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La présente étude examine l'effet d'incorporation de poudre de verre (PV) et de poudre de brique cuite (PB) comme substituants au ciment avec différentes finesses sur le comportement du mortier autoplaçant à l'état frais et l'état durci. Après avoir déterminé l'optimum de chaque composite cimentaire binaire (Ciment+PV) et (Ciment+PB), on a examiné l'effet combiné de PV et PB en composite cimentaire ternaire (Ciment+PV+PB) sur les propriétés mécaniques et la durabilité des MAP.
En se basant sur les résultats obtenus à travers cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La poudre de verre est un ajout cimentaire très intéressant du point de vue propriétés des MAP à l'état frais, sa présence améliore l'ouvrabilité du mortier, quelque soit sa surface spécifique. Cependant, la poudre de brique entraine une diminution de l'ouvrabilité des MAP. Cet effet est plus significatif pour des finesses élevées.

- Du point de vue de propriétés mécaniques, l'incorporation de PV ou de PB dans les compositions de MAP améliore les résistances à la compression et à la flexion à long terme. Par ailleurs, l'augmentation de la finesse a un effet positif sur le développement des résistances.

- La poudre de verre permet également de diminuer l'évolution du retrait, la porosité et l'absorption d'eau par immersion totale des MAP ce qui reflète un matériau plus durable. L'évolution de la porosité des MAP à la PB suit la même tendance que celles des mortiers au PV par contre l'influence de la PB sur l'absorption d'eau par immersion totale n'est pas appréciable. Cette dernière augmente considérablement avec la présence de PB.

- La PB entraine une légère augmentation de retrait, cette augmentation de retrait est plus significative avec l'accroissement de la surface spécifique de la PB quelque soit le taux de substitution de PB mais reste toujours inférieure au MAP témoin.

- L'utilisation de PV et PB réduit l'expansion de la réaction alcali silice et améliore la résistance à haute température des MAP, quel que soit le niveau de remplacement de ces ajouts.

- L'incorporation de PV et PB en combinaison est nettement bénéfique et considérable sur les performances et la durabilité des MAP. Il est obtenu une diminution du volume des éléments expansifs issus de RAS, et une augmention des résistances mécaniques.

- L'analyse par le MEB a indiqué que l'utilisation de PV et PB en combinaison a entraîné une amélioration de la porosité par remplissage des pores suite à la formation des nouveaux hydrates par l'effet pouzzolanique des poudres de verre et de la brique cuite surtout à long terme.

- La production de nouveaux composites cimentaires à base des déchets de verre et de brique semble être une solution prometteuse pour le recyclage de ces déchets et pour réduire la consommation de ciment dans la production de matériaux de construction et aussi pour réduire le cout de la production de béton et mortier.

.

Dans le cadre cette thèse, nous avons étudié l'effet du type, du dosage ainsi que de la finesse des ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et durabilité des MAP. Les résultats trouvés à travers cette étude ont permis d'apporter quelques éléments de réponse aux préoccupations posées, mais ils ont soulevé aussi quelques points intéressants à explorer à l'avenir :

- Une étude de la rhéologie en utilisant un rhéomètre de mortier et du béton serait très intéressante afin de déterminer les caractéristiques rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité), ce qui permet de bien comprendre l'effet de ces ajouts cimentaires (poudre de verre et poudre de brique) sur le comportement rhéologique des BAP.

- Elargir l'étude à l'état durci et réaliser des essais de durabilité plus approfondis tels que la carbonatation, la perméabilité à l'eau, aux gaz et aux ions chlorures.

- Etudier le comportement des MAP et BAP à base de ces ajouts en milieu agressif.

- Effet de la poudre de verre et de la poudre de brique comme ajout cimentaire ternaire sur les propriétés des bétons autoplaçants (BAP).

- Prévoir une modélisation des résultats trouvés permettant les prévisions des caractéristiques des bétons.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Z. Ge, Y. Wang, R. Sun, X. Wu, and Y. Guan, "Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 128–136, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100.

[2] S. B. Daneti and C. T. Tam, *Sustainability of Concrete Constructions : The Role of Materials and Practices*. Emerging Trends in civil Engineering, 2020.

[3] K. M. Liew, A. O. Sojobi, and L. W. Zhang, "Green concrete: Prospects and challenges," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 1063–1095, 2017.

[4] A. M. Falmata, A. Sulaiman, R. N. Mohamed, and A. U. Shettima, "Mechanical properties of self-compacting high-performance concrete with fly ash and silica fume," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1746-z.

[5] S. Boudali, S. Godbout, and J. Palacios, "Investigation potentiel implentation of different agro-wastes in concrete," 2019.

[6] C. Thormark, "The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 8, pp. 1019–1026, 2006.

[7] L. Szabó, I. Hidalgo, J. C. Císcar, A. Soria, and P. Russ, "Energy consumption and CO2 emissions from the world cement industry," *Eur. Comm. Jt. Res. Centre, Rep. EUR*, vol. 20769, 2003.

[8] T. CEMBUREAU, "World Statistical Review 1996-2008 Cement Production," *Trade, Consum. Data*, 2010.

[9] A. Palomo, P. Monteiro, P. Martauz, V. Bílek, and A. Fernandez-Jimenez, "Hybrid binders: A journey from the past to a sustainable future (opus caementicium futurum)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 124, p. 105829, 2019.

[10] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry," *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, pp. 2–26, 2018.

[11] F.FAO, *Food wastage footprint: impacts on natural resources: summary report*. Food & Agriculture Org Agriculture Organization of the United Nations (2013), 2013.

[12] D. Elzinga *et al.*, "Energy technology perspectives 2015: mobilising innovation to accelerate climate action," *Paris Int. Energy Agency*, 2015.

[13] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, "Carbon Dioxide Emission from the Global Cement Industry," no. November 2001, 2014, doi: 10.1146/annurev.energy.26.1.303.

[14] R. M. Andrew, "Global CO 2 emissions from cement production," pp. 195–217, 2018.

[15] N. Aissaoui, "L ' intelligence économique en Algérie : analyse des brevets comme indicateurs de la puissance innovatrice," pp. 47–71, 2020.

[16] "Ciment: Exportations De 5 Millions De Tonnes à Fin 2021." [Online]. Available: https://www.dzentreprise.net/ciment-exportations-2021. [Accessed: 09-Apr-2022].

[17] Y. Ouldkhaoua, "Développement des eco-betons autoplaçants a base des co-produits et déchets: caractérisation et performance." Thése de doctorat, Université Amar Telidji Laghouat-Algérie, 2020.

[18] T. Ling, C. Poon, and H. Wong, "Resources , Conservation and Recycling Management and recycling of waste glass in concrete products : Current situations in Hong Kong," vol. 70, pp. 25–31, 2013.

[19] A. M. Rashad, "Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 340–357, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.092.

[20] O. M. Olofinnade, J. M. Ndambuki, A. N. Ede, and C. Booth, "Application of waste

glass powder as a partial cement substitute towards more sustainable concrete production," *Int. J. Eng. Res. Africa*, vol. 31, pp. 77–93, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.31.77.
[21] R. Roy and P. Kumar, "Study and experiment analysis of the feasibility of partial replacement of industrial waste glass powder as cement in self compacting concrete," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 1–9, 2017, doi: 10.5958/2231-3915.2017.00007.4.
[22] S. S. Kouassi, J. Andji, J.-P. Bonnet, and S. Rossignol, "Dissolution of waste glasses in high alkaline solutions," *Ceramics-Silikáty*, vol. 54, no. 3, pp. 235–240, 2010.
[23] G. Korányi, *Surface properties of silicate glasses*. Akadámiai Kiadó, Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, 1963.
[24] K. Dan and L. Ward, "The history of Glass," *Orb. London, UK*, 1984.
[25] "U.S. Environmental Protection Agency | US EPA." .
[26] M. S. W. Total and M. S. W. Total, "Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the United States: facts and figures for 2012," 2014.
[27] C. Decisions, "| Us epa archive document," 2010.
[28] Y. Jani and W. Hogland, "Waste glass in the production of cement and concrete - A review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1767–1775, 2014, doi: 10.1016/j.jece.2014.03.016.
[29] U. Epa, "United States environmental protection agency," *Qual. Assur. Guid. Doc. Qual. Assur. Proj. Plan PM Ambient Air*, vol. 2, p. 12, 2001.
[30] L. M. Federico and S. E. Chidiac, "Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete–critical review of treatment methods," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 606–610, 2009.
[31] K. H. Tan and H. Du, "Use of waste glass as sand in mortar: Part I–Fresh, mechanical and durability properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117, 2013.
[32] N. Tamanna, N. M. Sutan, and I. Bin Yakub, "Utilization of waste glass in concrete," no. November 2016, 2013, doi: 10.3850/978-981-07-6059-5.
[33] I. B. Topçu and M. Canbaz, "Properties of concrete containing waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.07.003.
[34] C. Ambell, A. Björklund, and M. Ljunggren Söderman, "Potential för ökad materialåtervinning av hushållsavfall och industriavfall." KTH, 2010.
[35] "Revade 2019: Connaître les nouveautés en techniques de recyclage des déchets." [Online]. Available: https://www.aps.dz/sante-science-technologie/95410-revade-2019-une-opportunite-pour-connaitre-les-nouveautes-en-equipements-et-techniques-de-recyclage-des-dechets. [Accessed: 10-Apr-2022].
[36] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, and D. Rodriguez, "Studies on concrete containing ground waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–100, 2000.
[37] I. M. Metwally, "Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 47–53, 2007, doi: 10.1260/136943307780150823.
[38] A. Shayan and A. Xu, "Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 457–468, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.012.
[39] N. Schwarz, M. DuBois, and N. Neithalath, "Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 9, pp. 656–666, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.05.005.
[40] N. Schwarz, H. Cam, and N. Neithalath, "Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash," *Cem. Concr.*

Compos., vol. 30, no. 6, pp. 486–496, 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001.
[41] R. U. D. Nassar and P. Soroushian, "Field investigation of concrete incorporating milled waste glass," *J. Solid Waste Technol. Manag.*, vol. 37, no. 4, pp. 307–319, 2011, doi: 10.5276/JSWTM.2011.307.
[42] R. U. D. Nassar and P. Soroushian, "Use of milled waste glass in recycled aggregate concrete," *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.*, vol. 166, no. 5, pp. 304–315, 2013, doi: 10.1680/coma.11.00059.
[43] A. Mafalda and J. Sousa-coutinho, "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 205–215, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.
[44] N. Kumarappan, 'Partial replacement cement in concrete using waste glass,' Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 2, pp. 181–2278, 2013.," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, pp. 181–2278, 2013.
[45] M.Berraih, M.Elbar, K. Ayed, M. Mouli, and H. Khelafi, "Effet des déchets de bouteille de verre sur les caractéristiques mécaniques des mortiers," pp. 1–9.
[46] G. M. S. Islam, M. H. Rahman, and N. Kazi, "Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–44, 2017, doi: 10.1016/j.ijsbe.2016.10.005.
[47] M. B. Vanjare and S. H. Mahure, "Experimental Investigation on Self Compacting Concrete Using Glass Powder," vol. 2, no. 3, pp. 1488–1492, 2012.
[48] H. Öznur Öz, H. Erhan Yücel, and M. Güneş, "Comparison of Glass Powder and Fly Ash Effect on the Fresh Properties of Self-Compacting Mortars," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 245, no. 3, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/245/3/032036.
[49] N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, "Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 600–612, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073.
[50] B. Arab, R. Mehaddene, and Y. Bouchnab, "Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances," *Déchets, Sci. Tech.*, no. N°75, pp. 1–8, 2017, doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.3665.
[51] J. M. Khatib, E. M. Negim, H. S. Sohl, and N. Chileshe, "Glass Powder Utilisation in Concrete Production," *Eur. J. Appl. Sci.*, vol. 4, no. 4, pp. 173–176, 2012, doi: 10.5829/idosi.ejas.2012.4.3.1102.
[52] J. xin Lu, Z. hua Duan, and C. S. Poon, "Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 793–799, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.011.
[53] G. Vasudevan and S. G. K. Pillay, "Performance of using waste glass powder in concrete as replacement of cement," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 2, no. 12, pp. 175–181, 2013.
[54] A. Zidol, *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires*. 2009.
[55] K. H. Khayat, "Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 20, no. 2–3, pp. 171–188, 1998, doi: 10.1016/s0958-9465(98)80006-1.
[56] S. Chekireb, A. Tagnit-hamou, and A. Yahia, "Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant," *Mémoire de maitrise*, 2015.
[57] A. Shayan and A. Xu, "Value-added utilisation of waste glass in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 81–89, 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00251-5.
[58] B. Taha and G. Nounu, "Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 713–720, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019.

[59] Ö. Özkan and I. Yüksel, "Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1288–1298, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.015.
[60] A. Khmiri, M. Chaabouni, and B. Samet, "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 74–80, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040.
[61] A. Omran and A. Tagnit-Hamou, "Performance of glass-powder concrete in field applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. 109, pp. 84–95, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006.
[62] H. Siad, M. Lachemi, M. Sahmaran, and K. M. A. Hossain, "Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 163–173, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.049.
[63] W. K. Kupolati, W. Mbadie, J. Ndambuki, and R. Sadiku, "Environmental greening through utilization of glass waste for production of concrete," *OIDA Int. J. Sustain. Dev.*, vol. 6, no. 06, pp. 37–50, 2013.
[64] D. Patel, R. K. Yadav, and R. Chandak, "Strength characteristics of cement mortar paste containing coarse and fine waste glass powder," *Int. J. Eng. Sci. Res.*, vol. 2, pp. 683–686, 2012.
[65] S. Panchal, S. Sharma, M. M. Khan, A. Sharma, and A. K. Roy, "Effect of glass renforcement and glass powder on the characteristics of concrete."
[66] D. M. Patil and K. K. Sangle, "Experimental investigation of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete," *Int. J. Adv. Technol. Civ. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 2231–5721, 2013.
[67] H. Wang and T. Hou, "A Study of Elevated Temperatures on the Strength Properties of LCD Glass Powder Cement Mortars, Integrated Waste Management-Volume I, Mr," *Sunil Kumar (Ed.)*, 2011.
[68] G. Vijayakumar, M. H. Vishaliny, and D. Govindarajulu, "Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production," vol. 3, no. 2, pp. 153–157, 2013.
[69] W. Kushartomo, I. Bali, and B. Sulaiman, "Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute," *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 617–622, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.082.
[70] K. Sobolev, S. Soboleva, and G. Iscioglu, "Utilization of waste glass in ECO-cement : Strength properties and microstructural observations," vol. 27, pp. 971–976, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.014.
[71] J. S. Dali and S. N. Tande, "Performance of concrete containing mineral admixtures subjected to high temperature," in *37th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, August*, 2012.
[72] J. B. Jangid and A. C. Saoji, "Experimental investigation of waste glass powder as the partial replacement of cement in concrete production," in *International Conference on Advances in Engineering & Technology*, 2014, pp. 55–60.
[73] A. Anwar, "The influence of waste glass powder as a pozzolanic material in concrete," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 131–148, 2016.
[74] S. M. Chikhalikar and S. N. Tande, "An experimental investigation on characteristics properties of fibre reinforced concrete containing waste glass powder as pozzolona," in *37th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, August*, 2012.
[75] R. Vandhiyan, K. Ramkumar, and R. Ramya, "Experimental study on replacement of cement by glass powder," *Int. J. Eng. Res. Technol*, vol. 2, no. 5, pp. 234–238, 2013.
[76] R. U. D. Nassar and P. Soroushian, "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement," *Constr. Build.*

Mater., vol. 29, pp. 368–377, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061.
[77] A. Parghi and M. S. Alam, "Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, pp. 34–43, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.006.
[78] S. Cornac, C. Oms-Multon, G. Escadeillas, and P. de Caro, "Influence d'éco-produits réducteurs de retrait sur les caractéristiques des mortiers," in *24ème Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 2006.
[79] P. Turgut, "Properties of masonry blocks produced with waste limestone sawdust and glass powder," vol. 22, pp. 1422–1427, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.008.
[80] D. Patel, R. P. Tiwari, R. Shrivastava, and R. K. Yadav, "Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 199, pp. 406–415, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017.
[81] S. O. Nwaubani and K. I. Poutos, "The influence of waste glass powder fineness on the properties of cement mortars," *Int. J. Appl. or Innov. Eng. Manag.*, vol. 2, no. 2, pp. 110–116, 2013.
[82] R. Idir, "Mécanisme d'acton des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réacton pouzzolanique," no. January, p. 304, 2009.
[83] G. West, *Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges*. Thomas Telford, 1996.
[84] K. Zheng, "Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 67, pp. 30–38, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008.
[85] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 987–993, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.015.
[86] M. Liu, "Incorporating ground glass in self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 919–925, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.092.
[87] G. Ke, W. Li, R. Li, Y. Li, and G. Wang, "Mitigation effect of waste glass powders on alkali–silica reaction (ASR) expansion in cementitious composite," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2018.
[88] A. Karamberi and A. Moutsatsou, "Participation of coloured glass cullet in cementitious materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 319–327, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.021.
[89] J. Kim, J. H. Moon, J. W. Shim, J. Sim, H. G. Lee, and G. Zi, "Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 398–402, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.081.
[90] A. Zidol, "Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre." Thèse de Doctorat en Génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 2014.
[91] M. Kamali and A. Ghahremaninezhad, "Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 407–416, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010.
[92] A. Chabrelie, U. Mueller, and K. Scrivener, "Mechanisms of degradation of concrete by external sulfate ions under laboratory and field conditions," *13th Int. Congr. Chem. Cem.*, vol. 4597, 2011.
[93] P. Brown and R. D. Hooton, "Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements," vol. 24, pp. 361–370, 2002.
[94] A. M. Ramezanianpour, "Sulfate Resistance and Properties of Portland - Limestone

Cements," *Univ. Toronto*, p. 185, 2012.
[95] M. Bajad, C. Modhera, and A. Desai, "Effect of glass on strength of concrete subjected to sulphate attack," *Int. J. Civ. Eng. Res. Dev.*, vol. 1, no. 2, 2011.
[96] B. A. Tayeh, D. M. Al Saffar, A. S. Aadi, and I. Almeshal, "Sulphate resistance of cement mortar contains glass powder," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, no. xxxx, pp. 0–5, 2019, doi: 10.1016/j.jksues.2019.07.002.
[97] H. Lee, A. Hanif, M. Usman, J. Sim, and H. Oh, "Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material," *J. Clean. Prod.*, vol. 170, pp. 683–693, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.133.
[98] P.-C. Aïtcin and S. Mindess, *Sustainability of concrete*. CRC Press, 2011.
[99] C. Chao, H. U. Dan, and W. E. N. Qiu-xia, "Resource depletion and environmental discharge of cement production in China," *J. Anhui Agric. Sci.*, vol. 35, no. 28, p. 8986, 2008.
[100] Z. Ge, Z. Gao, R. Sun, and L. Zheng, "Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 289–293, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
[101] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 226–239, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.193.
[102] J. Lu, B. Z. Lu, S. G. Cao, P. X. Li, H. T. Wang, and H. Y. Shen, "Research on preparing cement admixture from waste brick powder," *Fly Ash Compr Util*, vol. 37, no. 2, pp. 37–42, 2012.
[103] L. Alviset, "Matériaux de terre cuite," *Tech. l'ingénieur*, vol. C905-1, p. 28, 1994.
[104] S.-A. Mohammed, "Formulation Et Comportement D ' Un Beton Fluide a Base De Granulats Recycles De," 2018.
[105] N. Y. Mostafa, S. A. S. El-Hemaly, E. I. Al-Wakeel, S. A. El-Korashy, and P. W. Brown, "Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of Egyptian industrial by-products: I: Silica fume and dealuminated kaolin," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 467–474, 2001.
[106] K. Yahya and H. Boussabaine, "Quantifying environmental impacts and eco-costs from brick waste," *Archit. Eng. Des. Manag.*, vol. 6, no. 3, pp. 189–206, 2010.
[107] H. Duan and J. Li, "Construction and demolition waste management: China's lessons," *Waste Management & Research*, vol. 34, no. 5. SAGE Publications Sage UK: London, England, pp. 397–398, 2016.
[108] A. Pappu, M. Saxena, and S. R. Asolekar, "Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 6, pp. 2311–2320, 2007.
[109] F. F. Zulzaha, "New plan to manage solid waste systematically," *The Star. Malaysia*, 2014.
[110] H. Siad, M. Lachemi, M. Sahmaran, H. A. Mesbah, K. M. Anwar Hossain, and A. Ozsunar, "Potential for using recycled glass sand in engineered cementitious composites," *Mag. Concr. Res.*, vol. 69, no. 17, pp. 905–918, 2017.
[111] C. Liang, B. Pan, Z. Ma, Z. He, and Z. Duan, "Utilization of CO2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 105, p. 103446, 2020.
[112] H. Li, L. Dong, Z. Jiang, X. Yang, and Z. Yang, "Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls," *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 1017–1026, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.149.
[113] R. A. Begum, C. Siwar, J. J. Pereira, and A. H. Jaafar, "A benefit–cost analysis on the

economic feasibility of construction waste minimisation: The case of Malaysia," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 48, no. 1, pp. 86–98, 2006.
[114] F. A. H. Asaari, H. B. A. Halim, and M. H. Isa, "A study on construction and demolition wastes from buildings in Seberang Perai," 2004.
[115] M. Agarwal and A. Krishan, "Reusability of Construction & Demolition waste in bricks," pp. 147–151, 2017.
[116] K.-L. Lin, H.-H. Wu, J.-L. Shie, C.-L. Hwang, and A. Cheng, "Recycling waste brick from construction and demolition of buildings as pozzolanic materials," *Waste Manag. Res.*, vol. 28, no. 7, pp. 653–659, 2010.
[117] M. Zeghad, J. Mitterpach, B. Safi, B. Amrane, and M. Saidi, "Reuse of refractory brick wastes (RBW) as a supplementary cementitious material in a concrete," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 75–80, 2017, doi: 10.3311/PPci.8194.
[118] A. Schackow, D. Stringari, L. Senff, S. L. Correia, and A. M. Segadães, "Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 82–89, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019.
[119] O. M. Olofinnade, A. N. Ede, J. M. Ndambuki, and G. O. Bamigboye, "Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement," *Mater. Sci. Forum*, vol. 866, pp. 63–67, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.866.63.
[120] I. Irki, F. Debieb, S. Ouzadid, H. L. Dilmi, C. Settari, and D. Boukhelkhel, "Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 9, pp. 963–975, 2018, doi: 10.1080/01694243.2017.1393202.
[121] M. Heikal, K. M. Zohdy, and M. Abdelkreem, "Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 101–109, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.114.
[122] A. Naceri and M. C. Hamina, "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 8, pp. 2378–2384, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.03.026.
[123] H. Cheng, "Reuse Research Progress on Waste Clay Brick," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 31, pp. 218–226, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.02.029.
[124] K. L. Lin, B. Y. Chen, C. S. Chiou, and An Cheng, "Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement," *Waste Manag. Res.*, vol. 28, no. 7, pp. 647–652, 2010, doi: 10.1177/0734242X09355853.
[125] I. Demir, H. Yaprak, and O. Simsek, "Performance of cement mortars replaced by ground waste brick in different aggressive conditions," *Ceram. - Silikaty*, vol. 55, no. 3, pp. 268–275, 2011.
[126] J. P. Gonçalves, L. M. Tavares, R. D. Toledo Filho, and E. M. R. Fairbairn, "Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1971–1979, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027.
[127] M. O'Farrell, S. Wild, and B. B. Sabir, "Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 1, pp. 81–91, 2001, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00070-6.
[128] M. S. Kirgiz, "Strength gain mechanisms of blended-cements containing marble powder and brick powder," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 165–172, 2015, doi: 10.1007/s12205-014-0557-4.
[129] J. M. Ortega, V. Letelier, C. Solas, G. Moriconi, M. Á. Climent, and I. Sánchez, "Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service

properties of mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 691–702, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161.
[130] N. R. Rakhimova and R. Z. Rakhimov, "Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste," *Mater. Des.*, vol. 85, pp. 324–331, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.182.
[131] M. O'Farrell, B. B. Sabir, and S. Wild, "Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 9, pp. 790–799, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014.
[132] K. Afshinnia and A. Poursaee, "The potential of ground clay brick to mitigate Alkali-Silica Reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 95, pp. 164–170, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.155.
[133] S. Liu, R. Dai, K. Cao, and Z. Gao, "The role of sintered clay brick powder during the hydration process of cement pastes," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 41, no. 2, pp. 159–165, 2017, doi: 10.1007/s40996-017-0049-0.
[134] R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, and E. M. R. Fairbairn, "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 9, pp. 1357–1365, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.005.
[135] L. Turanli, F. Bektas, and P. J. M. Monteiro, "Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 10, pp. 1539–1542, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00101-7.
[136] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd-Elmoaty, and H. H. Hassan, "Utilization of crushed clay brick in concrete industry," *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 151–168, 2014, doi: 10.1016/j.aej.2013.12.003.
[137] J. E. Oti and J. Kinuthia, "Engineering Properties of Concrete," no. July, pp. 33–45, 2016.
[138] Y. Zhao, J. Gao, C. Liu, X. Chen, and Z. Xu, "The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement," *J. Clean. Prod.*, vol. 242, p. 118521, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118521.
[139] M. Karatas, K. Turk, M. Acikgenc, and Z. C. Ulucan, "Effect of Elazig Region Waste Brick Powder on Strength and Viscosity Properties of Self Compacting Mortar," *9th Int. Congr. Adv. Civ. Eng.*, no. September, pp. 27–30, 2010.
[140] L. G. Li, Z. H. Lin, G. M. Chen, and A. K. H. Kwan, "Reutilizing clay brick dust as paste substitution to produce environment-friendly durable mortar," *J. Clean. Prod.*, vol. 274, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122787.
[141] F. Bektas, *Use of ground clay brick as a supplementary cementitious material in concrete-hydration characteristics, mechanical properties, and ASR durability*. Iowa State University, 2007.
[142] S. Wild, J. M. Khatib, and M. o'Farrell, "Sulphate resistance of mortar, containing ground brick clay calcined at different temperatures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 5, pp. 697–709, 1997.
[143] A. S. E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, and S. Kenai, "Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 251–257, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109.
[144] R. P. Douglas, "Properties of Self-Consolidating Concrete Containing Type F Fly Ash : With a verification of the minimum paste volume," *PCA R&D Ser. No. 2619*, vol. M, no. 2619, pp. 1–83, 2004.
[145] B. H. Nagaratnam, M. E. Rahman, A. K. Mirasa, M. A. Mannan, and S. O. Lame, "Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 882–894, 2016, doi:

10.1016/j.jclepro.2015.05.112.
[146] G. De Schutter, P. J. M. Bartos, P. Domone, and J. Gibbs, *Self-compacting concrete*, vol. 288. Whittles Publishing Scotland, UK, 2008.
[147] S.-C. Concrete, "The European guidelines for self-compacting concrete," *BIBM, al*, vol. 22, p. 563, 2005.
[148] O. Boukendakdji, E. H. Kadri, and S. Kenai, "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 583–590, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013.
[149] A. R. Esquinas, E. F. Ledesma, R. Otero, J. R. Jiménez, and J. M. Fernández, "Mechanical behaviour of self-compacting concrete made with non-conforming fly ash from coal-fired power plants," *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 385–398, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.094.
[150] P. Diederich, "Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton." Toulouse 3, 2010.
[151] G. Benkechkache and H. Houari, "Etude du comportement différés des bétons autoplaçants: influence des paramètres de composition et de chargement," *Mémoire magister, Univ. Mentouri Constantine*, 2007.
[152] Q. Wu and X. An, "Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 642–651, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.008.
[153] S. Bethmont, "Mecanismes de segregation dans les betons autoplacants (BAP): Etude experimentale des interactions granulaires," *Thèse Docteur l'école Natl. des ponts chausses spécialité Struct. matériaux*, 2005.
[154] H. Okamura and M. Ouchi, "Sel-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, April 2003," vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
[155] O. Petersson, P. Billberg, and B. K. Van, "A model for Self-Compacting Concrete International Rilem Conference on" Production Methods and Workability of Concrete," in *RILEM Proceedings*, 1996, vol. 32, p. 1996.
[156] S. Tangtermsirikul and V. K. Bui, "Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete," in *Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil thailand engineering*, 1995, pp. 58–69.
[157] V. K. Bui, D. Montgomery, I. Hinczak, and K. Turner, "Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 9, pp. 1489–1496, 2002.
[158] V. K. Bui, Y. Akkaya, and S. P. Shah, "Rheological model for self-consolidating concrete," *Mater. J.*, vol. 99, no. 6, pp. 549–559, 2002.
[159] T. Sedran and F. De Larrard, "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model," in *Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7*, 1999, pp. 321–332.
[160] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *Struct. Concr.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 2000.
[161] B. Persson, "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 2, pp. 193–198, 2001.
[162] O. Boukendakdji, "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant: optimisation des conditions opératoires." Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb …, 2010.
[163] T. C. RILEM, "174 SCC, Self compacting concrete, State-of-the-art report of RILEM technical committe 174-SCC. Skarendahl A, Petersson O, editors." RILEM

Publications SARL, France, 2000.
[164] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, *An introduction to rheology*, vol. 3. Elsevier, 1989.
[165] G. Couarraze and J.-L. Grossiord, "Initiation à la rhéologie," 2000.
[166] T. Yen, C.-W. Tang, C.-S. Chang, and K.-H. Chen, "Flow behaviour of high strength high-performance concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 5–6, pp. 413–424, 1999.
[167] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, and H. Li, "Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 83, pp. 146–159, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016.
[168] A. française de génie civil, *Recommandations pour l'emploi des bétons auto-plaçants: ecommendations for use of self-compacting concrete*. AFGC, 2008.
[169] K. H. Khayat and K. Manai, "Les betons autonivlants: proprietes, caracterisation et applications," in *Colloque sur les bétons autonivlants, Université de Sherbrooke, Canada*, 1996.
[170] S. Girish, R. V Ranganath, and J. Vengala, "Influence of powder and paste on flow properties of SCC," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 12, pp. 2481–2488, 2010.
[171] F. CUSSIGH, "Bétons auto-plaçants. Recommandations provisoires," *Ann. du bâtiment des Trav. publics*, no. 3, pp. 15–38, 2000.
[172] T. Sedran, "Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants." Marne-la-vallée, ENPC, 1999.
[173] Ö. Petersson and P. Billberg, "Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 333–344.
[174] B. Chouinard, "Étude Des Relations Entre La Rhéologie Du Béton Et Sa Pompabilité," p. 213, 1999.
[175] S. Rizwan, T. Bier, and H. Ahmad, *Self-Compacting Concrete- A Useful Technology*. 2004.
[176] K. H. Khayat, "Optimization and performance of air-entrained, self-consolidating concrete," *Materials journal. J.*, vol. 97, no. 5, pp. 526–535, 2000.
[177] S. Utsi, M. Emborg, and J. Carlsward, "Relation between workability and rheological parameters," in *Third international RILEM symposium, RILEM Pub. PRO*, 2003, vol. 33, pp. 154–164.
[178] H. Okamura, M. Ouchi, and S.-C. Concrete, "Development, present use and future," in *Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm*, 1999, pp. 3–14.
[179] B.-G. Kim, S. Jiang, C. Jolicoeur, and P.-C. Aïtcin, "The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 6, pp. 887–893, 2000.
[180] M. Behim and A. Boucetta, "Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (Laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre)," in *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran, Algeria*, 2009, pp. 12–14.
[181] N. Sakata, S. Yanai, K. Yokozeki, and K. Maruyama, "Study on new viscosity agent for combination use type of self-compacting concrete," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 37–41, 2003.
[182] K. Manai, *Etude de l'effet d'ajouts chimiques et mineraux sur la maniabilite, la stabilite et les performances des betons autonivelants.* Mémoire de maitrise és sciences appliquées de l'universite de Sherbrooke, 1996.
[183] R. Dupain, R. Lanchon, and J. C. SAINT ARROMAN, "″Granulats, sols, ciments et

bétons–caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ″Collection CAPLIEZ, édition CASTEILLA,” *V235, Paris*, 2000.
[184] H. Fares, “Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée.” Université de Cergy Pontoise, 2009.
[185] Y. Klug and K. Holschemacher, “Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete,” in *Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*, 2003, pp. 596–605.
[186] P. L. Domone, “A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 1, pp. 1–12, 2007.
[187] B. Felekoglu and B. Baradan, “A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete,” 2003.
[188] V.-H. Nguyen, N. Leklou, J.-E. Aubert, and P. Mounanga, “The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 479–484, 2013.
[189] P. Turcry, “Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation.” Nantes, 2003.
[190] A. Pineaud, “Contributiona l’étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et applicationa l’industrie de la préfabrication,” *These Dr. Univ. Cergy-Pontoise*, p. 271, 2007.
[191] M. Uysal and K. Yilmaz, “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 7, pp. 771–776, 2011.
[192] H. H. Nassif, H. Najm, and N. Suksawang, “Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 6, pp. 661–670, 2005.
[193] A. El Hilali, “Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): influence des fines calcaires et des fibres végétales.” Cergy-Pontoise, 2009.
[194] E. Rozière, S. Granger, P. Turcry, and A. Loukili, “Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 8, pp. 626–636, 2007.
[195] A. Leemann, P. Lura, and R. Loser, “Shrinkage and creep of SCC–The influence of paste volume and binder composition,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2283–2289, 2011.
[196] M. Valcuende, C. Parra, E. Marco, A. Garrido, E. Martínez, and J. Cánoves, “Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 122–128, 2012.
[197] H. W. Song, K. J. Byun, S. H. Kim, and D. H. Choi, “Early-age creep and shrinkage in self-compacting concrete incorporating GGBFS,” in *Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Tokyo: COMS Engineering Corporation*, 2001, pp. 413–422.
[198] H.-E. Gram and P. Pentti, “Properties of SCC: Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance,” in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 211–225.
[199] J. Baron *et al.*, *La durabilité des bétons*. 1992.
[200] A. N. Neville, *Propriétés des bétons*. Eyrolles, 2000.
[201] R. T. Committee, “Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 2, pp. 225–233, 2008.
[202] W. Zhu and P. J. M. Bartos, “Permeation properties of self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 6, pp. 921–926, 2003.
[203] F.-J. Ulm, O. Coussy, and Z. P. Bažant, “The ‘Chunnel’ fire. I: Chemoplastic softening

in rapidly heated concrete," *J. Eng. Mech.*, vol. 125, no. 3, pp. 272–282, 1999.
[204] M. Castellote, C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas, and J. Campo, "Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 1633–1644, 2004.
[205] R. Blundell, R. G. Browne, and C. Dimond, *The properties of concrete subjected to elevated temperatures*. UEG, 1976.
[206] C. De Sa, "Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton. Influence des gradients et des incompatibilités de déformation." École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2007.
[207] J. Piasta, "Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste," *Mater. Struct.*, vol. 17, pp. 415–420, 1984.
[208] B. Persson, "Fire resistance of self-compacting concrete, SCC," *Mater. Struct.*, vol. 37, pp. 575–584, 2004.
[209] C. I. M. BETON, "les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre," *Tome2, 137p janvier*, 2013.
[210] B. O, "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires," *Thèse Dr. l'Université Blida-1*, 2010.
[211] B. Benabed, "Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants," *thèse Dr.*, p. 245, 2014.
[212] A. S. E. Belaidi, "Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant: apport des ajouts cimentaires ternaires et fillers locaux et industriels," *thèse Dr.*, 2013.
[213] B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, and M. Maallem, "The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 436–442, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049.
[214] T. Bouziani, "Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 308–314, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.039.
[215] A. Tahar, "contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances." thèse de DOCTORAT, Université de ANNABA, 2014.
[216] H. Naima, C. Rabah, G. Youcef, and A. Naima, "The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete," *J. Build. Mater. Struct.*, vol. 1, no. 1, pp. 65–67, 2014.
[217] A. Boukhelkhal, L. Azzouz, A. S. E. Belaïdi, and B. Benabed, "Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 22, pp. 2405–2419, 2016, doi: 10.1080/01694243.2016.1184402.
[218] Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, and A. Makhloufi, "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 82, no. March 2018, pp. 89–100, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059.
[219] I. Irki, F. Debieb, E. H. Kadri, O. Boukendakdji, M. Bentchikou, and H. Soualhi, "Effect of the length and the volume fraction of wavy steel fibers on the behavior of self-compacting concrete," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 7, pp. 735–748, 2017, doi: 10.1080/01694243.2016.1231394.
[220] M. Salhi, M. Ghrici, A. Li, and T. Bilir, "Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 5, no. 4,

pp. 359–375, 2017, doi: 10.12989/acc.2017.5.4.359.
[221] M. Omrane, S. Kenai, E. H. Kadri, and A. Aït-Mokhtar, “Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan,” *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 415–430, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.139.
[222] I. Irki, M. Euldji, H. Bensaber, and C. Settari, “Characterization of stem phoenix fibres as potential reinforcement of self compacting mortar,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 15, pp. 1629–1642, 2018, doi: 10.1080/01694243.2018.1442654.
[223] B. Hamza, M. Belkacem, K. Said, and Y. Walid, “Performance du béton autoplaçant à base de granulats en caoutchouc recyclés,” *MATEC Web Conf.*, vol. 149, 2018, doi: 10.1051/matecconf/201714901070.
[224] O. K. Djelloul, B. Menadi, G. Wardeh, and S. Kenai, “Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag,” *Adv. Concr. Constr.*, vol. 6, no. 2, pp. 103–121, 2018, doi: 10.12989/acc.2018.6.2.103.
[225] A. Boukhelkhal, L. Azzouz, S. Kenai, E. H. Kadri, and B. Benabed, “Combined effects of mineral additions and curing conditions on strength and durability of self-compacting mortars exposed to aggressive solutions in the natural hot-dry climate in North African desert region,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 307–318, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.233.
[226] A. Benyahia and M. Ghrici, “Behaviour of self compacting repair mortars based on natural pozzolana in hot climate,” *Adv. Concr. Constr.*, vol. 6, no. 3, pp. 285–296, 2018, doi: 10.12989/acc.2018.6.3.285.
[227] M. Sahraoui and T. Bouziani, “Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC,” *J. Build. Eng.*, vol. 26, p. 100890, 2019.
[228] Z. Skender, A. Bali, and R. Kettab, “Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 10, pp. 1852–1873, 2021.
[229] Y. Hadj aissa, I. Goual, and B. Benabed, “Mix-design and properties of self-compacting concrete made with calcareous tuff,” *J. Build. Eng.*, vol. 27, p. 100997, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100997.
[230] A. Barkat, S. Kenai, B. Menadi, E. Kadri, and H. Soualhi, “Effects of local metakaolin addition on rheological and mechanical performance of self-compacting limestone cement concrete,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 9, pp. 963–985, 2019, doi: 10.1080/01694243.2019.1571737.
[231] S. Benyamina, B. Menadi, S. K. Bernard, and S. Kenai, “Performance of Self-compacting Concrete with Manufactured Crushed Sand,” *Adv. Concr. Constr.*, vol. 7, no. 2, pp. 87–96, 2019, doi: 10.12989/acc.2019.7.2.087.
[232] Z. E. A. Laidani, B. Benabed, R. Abousnina, M. K. Gueddouda, and M. J. Khatib, “Potential pozzolanicity of Algerian calcined bentonite used as cement replacement: optimisation of calcination temperature and effect on strength of self-compacting mortars,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–23, 2020, doi: 10.1080/19648189.2020.1713898.
[233] I. Zemir, F. Debieb, S. Kenai, Y. Ouldkhaoua, and I. Irki, “Strengthening of ordinary vibrated concrete using steel fibers self-compacting concrete,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 14, pp. 1556–1571, 2020, doi: 10.1080/01694243.2020.1712769.
[234] E. Des, A. S. E. Des, P. Et, and A. Et, “Doctorat en 3ème cycle (LMD),” no. Lmd, 2020.
[235] S. Hammat, “Retrait d’un BAP à base de pouzzolane naturelle et laitier de différentes finesses.” Thèse de Doctorat de l’ Université Blida1-Saad Dahlab.
[236] B. S. EN, “197-1: 2000, Cement: Part 1: Composition, specifications and conformity

criteria for common cements", British Standards Institute, 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL." 2000.
[237] E. N. Tab and E. T. Tab, "Medaflow 145," vol. 81, no. 213, p. 16270, 2017.
[238] P. J. Domone and J. JIN, "Properties of mortar for self-compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 109–120.
[239] E. N. 12390-3, "Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens." CEN Brussels, 2009.
[240] B. S. EN, "12390-5. Testing hardened concrete–Part 5: flexural strength of test specimens," *Br. Stand. Institution-BSI CEN Eur. Comm. Stand.*, 2009.
[241] C. Astm, "642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 4, no. 2, 2006.
[242] AFPC-AFREM, "Durabilité des bétons 'Méthodes recommandées pour lamesure des grandeurs associées à la durabilité'[Durability of concrete–'recommended methods for the measurement of durability indicators]," *Compte-rendu des journées techniques*. LMDC Toulouse, France, 1997.
[243] H. Hornain, *GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons*. Presses des Ponts, 2007.
[244] P. NF, "P 18-459, Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique," *Mars*, 2010.
[245] "Norme NF P15-433." .
[246] C. Astm, "1260 Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)," *Section*, vol. 4, pp. 676–680, 2007.
[247] J.-X. Lu, B.-J. Zhan, Z.-H. Duan, and C. S. Poon, "Improving the performance of architectural mortar containing 100% recycled glass aggregates by using SCMs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 975–985, 2017.
[248] A. Spengler and P. Schiessl, "Sand-rich self-compacting concrete," in *2 nd International Symposium on Self Compacting Concrete. Japan*, 2001, pp. 387–392.
[249] J. K. Su, S. W. Cho, C. C. Yang, and R. Huang, "Effect of sand ration on the elastic modulus of self-compacting concrete," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 1, p. 2, 2002.
[250] K. I. M. Ibrahim, "Case Studies in Construction Materials Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. June, p. e00630, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00630.
[251] Y. Jiang, T. Ling, K. Hung, and C. Shi, "A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products," *J. Environ. Manage.*, vol. 242, no. November 2018, pp. 440–449, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.098.
[252] H. A. Elaqra, M. A. A. Haloub, and R. N. Rustom, "Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 75–82, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077.
[253] M. Jalalinejad, A. Hemmati, and A. Mortezaei, "Mechanical and Durability Properties of Sustainable Self-compacting Concrete with Waste Glass Powder and Silica Fume," vol. 67, no. 3, pp. 785–794, 2023.
[254] R. Sun, D. Huang, Z. Ge, Y. Hu, and Y. Guan, "Properties of self-consolidating concrete with recycled clay-brick-powder replacing cementitious material," vol. 0373, no. June 2016, 2014, doi: 10.1080/21650373.2014.946542.
[255] Z. Ma, Q. Tang, H. Wu, J. Xu, and C. Liang, "Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste," *Cem. Concr. Compos.*, p. 103758, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103758.

[256] S. Iqbal, M. Arslan, S. Room, and K. Mahmood, “Effect of Brick Powder and Stone Dust on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete.”
[257] M. Si-ahmed and S. Kenai, “Behavior of Self-compacting Mortars Based on Waste Brick Powder,” pp. 39–44, 2020, doi: 10.2174/2666145413666200219091459.
[258] Y. Du, W. Yang, Y. Ge, S. Wang, and P. Liu, “Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material,” *J. Clean. Prod.*, vol. 287, p. 125018, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125018.
[259] H. Elaqra and R. Rustom, “Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 179, pp. 326–335, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.263.
[260] Z. E. Abib, H. Gaher-Abib, and F. Kharchi, “Effect of clay fines on the behavior of self-compacting concrete,” 2013.
[261] Y. F. Silva, D. A. Lange, and S. Delvasto, “Effect of incorporation of masonry residue on the properties of self-compacting concretes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, pp. 277–283, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.132.
[262] A. M. Mansor, A. M. M. Hamed, and R. P. Borg, “Effect of fine clay brick waste on the properties of self compacting concrete,” *Alex. Eng. J*, pp. 1–7, 2016.
[263] K. Kartini, M. N. Rohaidah, and Z. A. Zuraini, “Performance of ground clay bricks as partial cement replacement in grade 30 concrete,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 68, pp. 362–365, 2012.
[264] V. Letelier, E. Tarela, and G. Moriconi, “Mechanical properties of concretes with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement,” *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 627–632, 2017.
[265] M. U. Shah, M. Usman, M. U. Hanif, I. Naseem, and S. Farooq, “Utilization of solid waste from brick industry and hydrated lime in self-compacting cement pastes,” *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 5, p. 1109, 2021.
[266] M. Liaqat, M. L. Shah, and M. A. Baig, “Effect of waste glass as partial replacement for coarse aggregate in concrete,” *Int. J. Tech. Innov. Mod. Eng. Sci.*, vol. 4, no. 6, pp. 2455–2585, 2018.
[267] H. Du and K. H. Tan, “Waste glass powder as cement replacement in concrete,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 12, no. 11, pp. 468–477, 2014.
[268] B. Taha and G. Nounu, “Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 12, pp. 709–721, 2009.
[269] B. Balasubramanian, G. V. T. Gopala Krishna, V. Saraswathy, and K. Srinivasan, “Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 278, p. 122400, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122400.
[270] C. Tasdemir, “Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 10, pp. 1637–1642, 2003.
[271] Y. F. Silva and S. Delvasto, “Sulfate attack resistance of self-compacting concrete with residue of masonry,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, p. 121095, 2021.
[272] R. Amjadi, M. Monazami, E. Mohseni, H. Azar Balgouri, and M. M. Ranjbar, “Effectiveness of different recycled materials in self-compacting mortar,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 12, pp. 1485–1501, 2017, doi: 10.1080/19648189.2016.1175974.
[273] Z. hai He, P. min Zhan, S. gui Du, B. ju Liu, and W. bin Yuan, “Creep behavior of concrete containing glass powder,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 166, no. November 2018, pp. 13–20, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.133.

[274] J. Lu, H. Zheng, S. Yang, P. He, and C. S. Poon, “Co-utilization of waste glass cullet and glass powder in precast concrete products,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 223, pp. 210–220, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.231.
[275] G. C. Cordeiro and P. Alegre, “Potencial de argila caulinítica de Campos dos Goytacazes , RJ , na produção de pozolana para concreto de alta resistência (Potential of kaolinitic clay from Campos dos Goytacazes , RJ ,” vol. 56, pp. 71–76, 2010.
[276] 50: 664–670. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.015.A study on the macro and micro properties of concrete with LCD glass Wang, Her Yungwith LCD glass.” Constr. Build. Mater., H. H. Zeng, and J. Y. Wu, “Wang, H. Y., H. H. Zeng, and J. Y. Wu. 2014. “A study on the macro and micro properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 664–670, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.015.
[277] D. Patel, R. P. Tiwari, R. Shrivastava, and R. K. Yadav, “Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 199, pp. 406–415, 2019.
[278] Z. Zhao, A. Grellier, M. E. K. Bouarroudj, F. Michel, D. Bulteel, and L. Courard, “Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability,” *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 102898, 2021.
[279] P. Zhu, X. Mao, W. Qu, Z. Li, and Z. J. Ma, “Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 246–254, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.040.
[280] R. Sun, D. Huang, Z. Ge, Y. Hu, and Y. Guan, “Properties of self-consolidating concrete with recycled clay-brick-powder replacing cementitious material,” *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 3, no. 3–4, pp. 211–219, 2014.
[281] N. P. Hasparyk, P. J. M. Monteiro, and H. Carasek, “Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction,” *Mater. J.*, vol. 97, no. 4, pp. 486–492, 2000.
[282] A. S. AS3600, “Concrete structures, standards Australia,” *Sydney. Search in*, 2001.
[283] G. A. Khoury, “Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 44, no. 161, pp. 291–309, 1992, doi: 10.1680/macr.1992.44.161.291.
[284] O. Arioz, “Effects of elevated temperatures on properties of concrete,” *Fire Saf. J.*, vol. 42, no. 8, pp. 516–522, 2007, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.01.003.
[285] M. Z. Guo, Z. Chen, T. C. Ling, and C. S. Poon, “Effects of recycled glass on properties of architectural mortar before and after exposure to elevated temperatures,” *J. Clean. Prod.*, vol. 101, pp. 158–164, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.004.
[286] R. Yan, S. Yang, M. Z. Guo, and C. sun Poon, “Comparative evaluation of fire resistance of partition wall blocks prepared with waste materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 156–165, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.020.
[287] M. Y. Durgun and A. H. Sevinç, “High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, pp. 66–81, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.087.
[288] S. Yüksel, R. Siddique, and Ö. Özkan, “Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 967–972, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.085.
[289] D. N. Crook and M. J. Murray, “Regain of strength after firing of concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 22, no. 72, pp. 149–154, 1970, doi: 10.1680/macr.1970.22.72.149.
[290] A. H. Akca and N. Özyurt, “Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 168, pp. 431–441, 2018, doi:

10.1016/j.conbuildmat.2018.02.122.
[291] T. C. Ling, C. S. Poon, and S. C. Kou, “Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 2, pp. 265–272, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.010.
[292] N. A. Shukri *et al.*, “Effects of elevated temperature on high performance concrete incorporating of metakaolin and garnet,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 220, no. 1, p. 12035.
[293] C. Kahanji, F. Ali, and A. Nadjai, “Explosive spalling of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams under fire,” *J. Struct. Fire Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 328–348, 2016.
[294] C. S. Poon, S. Azhar, M. Anson, and Y. L. Wong, “Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 1, pp. 83–89, 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(01)00061-0.
[295] B. El-Jazairi and J. M. Illston, “The hydration of cement paste using the semi-isothermal method of derivative thermogravimetry,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 361–366, 1980.

ANNEXE

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DE MORTIER

ANNEXE
Exemple de calcul de la composition de mortier

1. Caractéristiques physique des matériaux

Masses volumiques :

- Ciment : ρ_c = 3120 kg/m^3
- Sable : ρ_s = 2630 kg/m^3
- Verre: ρ_v = 2500 kg/m^3
- Brique cuite : ρ_b = 2600 kg/m^3
- Superplastifiant : ρ_{sp} = 1070 kg/m^3
- Eau : ρ_E = 1000 kg/m3

- **Coefficient d'absorption du sable :** *Ab*= 0,7%
- **Le rapport Sable/Mortier** : S/M = 0,50
- **Le rapport (par poids) Eau/Liant** : E/L= 0,4
- **Le rapport Superplastifiant/Liant** : Sp/L= 0,85

Le superplastifiant (MEDAFOW 145) est de 30% extrait (contient 70% d'eau).

2. Calcul de l'humidité du sable

Un échantillon de sable est pesé, ayant une masse M1. L'échantillon est mis dans une étuve à 105°C pendant 8 minutes puis pesé une deuxième fois. Une masse M2 est obtenue.
L'humidité du sable μs est calculée par la formule :

$$\mu s = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$$

3. Calcul du dosage des constituants du mortier

- **Le ciment :** Le pourcentage en volume du ciment ***C%***:

$$Cvol\ (\%) = \frac{(1 - \frac{S}{M})}{(1 + \boldsymbol{E/C}parvolume)} \times 100$$

La quantité de ciment ***C*** en **kg**:

$$\boldsymbol{C(Kg) = \frac{V \times E/Cparvolume}{100} \times \rho c}$$

◎ ◎ ◎

- ◎**Le Sable :** La quantité du sable en kg S :

$$\boldsymbol{S(Kg) = (1 + \frac{Correction}{100}) \times (\frac{V \times \frac{S}{M} \times \rho s}{100})}$$

- **Le superplastifiant:** La quantité du superplastifiant est Sp :

$$\boldsymbol{Sp(Kg) = \frac{\%Sp \times C}{100}}$$

- **L'eau :** L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties. une première partie E1, qui est de 70% de la quantité d'eau globale. Cette dernière est rajoutée lors du malaxage durant la première minute. La deuxième quantité E2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant et ajoutée au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage.

Le pourcentage d'eau en volume : % Evol

$$\boldsymbol{\%Evol = \frac{(1 - \frac{S}{M}) \times 100 \times E/Cparvolume}{(1 + E/Cparvolume)}}$$

La quantité globale ***E*** en litre :

$$\boldsymbol{E = \left(\frac{V \times \%Evol}{100} \times \frac{\rho E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S/M \times \rho s}{1000} \times \frac{Correction}{100}\right)}$$

Eau1 $E_1 = E \times 0.70$

Eau2 $E_2 = E \times 0.30$

Tableau A : Feuille Excel donnant la composition du mortier

Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier — Entrer data dans cellules en rouge

Valeurs calculées dans cellules en noir

Référence du mélange — Essai N° CEM I 42,5 — Date 18/02/2024

0 % de Mg

0 % de Poudre de marbre

volume de mortier (litres) 1000,00

sable/mortier vol 0,50

E/P par vol. 1,249 — poudre vol (' 22,232 — Eau volume 27,768

composition Poudre(vol %) — type

ciment portland 100

Poudre de verre 0

Poudre de M brique 0

superplast - MEDAFLOW145 0,9 % (Sp/P)

Densité relative de la poudre 3,12

teneur en eau du sable

	humidité (%ab)		absorption(%	correction (%)
poids humide (g)	200	0,00	0,70	-0,70
poids sec (g)	200			

Materiaux	Volume litres	Densité kg/m³	Masse kg	Contenance d'eau %	Contenance d'eau kg	poids mélange kg			
poudre	222,321	3120	693,642			**693,642**			
Ciment	222,321	3120	693,642			**693,642**			
Poudre de verre	0,000	2500	0,000			**0,000**			
Poudre de brique	0,000	2600	0,000			**0,000**			
Eau	277,679	1000	277,7			**282,76**	**W1**	197,930	70% W
							W2	84,827	30% W
superplastifiant MEDAFLOW 145		1070	5,90	70	4,127	**5,896**			
Sable	500,000	2630	1315,000	-0,70	-9,205	**1315,000**			
Total	**1000,000**					2297,294			

E/P poids = **0,400**

100%C					
Volume	**1**	**poids mélange g**			
poudre		**693,642**			T
Ciment	0,222	**693,64**			
PV	0,000	**0,00**			
PB	0,000	**0,00**			
Eau	0,278	**282,76**	**W1**	197,9	
	E théorique	277,68	**W2**	84,8	
superplastifiant MEDAFLOW 145		**5,90**			
Sable	0,5000	**1315,0**			
Total	1,0000	2297,3			

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

✓ PUBLICATIONS INTERNATIONALES

Yasmina Bouleghebar et al. The effect of Brick and Glass powder on the Mechanical properties and porosity of self-compacting Mortar. Journal of Applied Engineering and Sciences (2023) : https://sciendo.com/article/10.2478/jaes-2023-0006.

Yasmina Bouleghebar et al. Mechanical properties and durability evaluation of self-compacting mortars containing glass and brick powders. Journal of Studies in Engineering and Exact Sciences (2024): https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/sees/article/view/5864

✓ COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

Yasmina Bouleghebar et al. Effet de la poudre du verre sur les propriétés mécaniques et de durabilité du mortier autoplaçant : Séminaire international sur L'INGENEIERIE DE LA CONSTRUCTION DES VILLES (Architecture, Génie Civil, Hydrolique, Travaux publiques, Urbanisme) 09&10 Octobre 2021, Oran-Algérie. https://www.aneau.org/ajeau/

Yasmina Bouleghebar et al. Etude sur l'utilisation de déchets de briques calcinées pour développer un mortier autoplaçant écologique : Séminaire international sur L'INGENEIERIE DE LA CONSTRUCTION DES VILLES (Architecture, Génie Civil, Hydrolique, Travaux publiques, Urbanisme) 09&10 Octobre 2021, Oran-Algérie. https://www.aneau.org/ajeau/

Yasmina Bouleghebar et al. Etude expérimentale sur la réutilisation des déchets de verre en poudre pour développer un béton écologique : 1st International Conference on Chemical matters and Environnlent Preservation « IC-CMEP'22 » 09&10 March 2022, Ouargla-Algérie. https://iccmep.sciencesconf.org

✓ COMMUNICATIONS NATIONALES

Yasmina Bouleghebar et al. Etude des propriétés d'un mortier de la brique cuite comme substituant au ciment : 1er Séminaire National de l'Environnement et des Phénomènes de transport « SNETP20 » 03&04 Mars 2020, Médéa-Algérie. https://artst.dz Programme-manif-scient-2020

Yasmina Bouleghebar et al. Utilisation de déchets de verre dans le mortier : 1st National Conference on Civil Engineering and Environment « NCC2E'21 » 08&09 Décembre 2021, Médéa-Algérie. https://www.univ-medea-.dz

Yasmina Bouleghebar et al. Valorisation de déchets de briques pour le développement d'un mortier autoplaçant-Propriétés mécaniques et durabilité : 1er Séminaire National sur la Gestion Durable des Ressources en Eau et la Valorisation des Sous-Produits « GDRE-VSP 2022» 14&15 Novembre 2022, Alger-Algérie. https://gdrevsp2022.sciencesconf.org