



UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de

# DOCTORAT en 3ème cycle (LMD)

Spécialité: Génie Civil

Option: Génie Civil

Par

**Mr. YOUNES OULDKHAOUA**

Thème

---

## DEVELOPPEMENT DES ECO-BETONS AUTOPLAÇANTS À BASE DES CO-PRODUITS ET DECHETS : CARACTERISATION ET PERFORMANCE

---

Soutenue le : 23/06/2020, devant le jury composé de :

Pr. Mohamed Sayeh Goual	Université de Laghouat	Président
Pr. Farid Debieb	Université de Médéa	Examineur
Pr. Otmane Boukendakdji	Université de Médéa	Examineur
Pr. Tayeb Bouziani	Université de Laghouat	Examineur
Pr. Benchaa Benabed	Université de Laghouat	Directeur de thèse
Pr. Jamal Khatib	Université de Beyrouth	Co-directeur de thèse
Pr. El-Hadj Kadri	Université de Cergy Pontoise	Invité

## DEDICACE

*Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné toute la volonté et la patience pour aboutir à la réalisation de ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma source de douceur, de tendresse, d'amour et affection et grâce aux encouragements et aux sacrifices qu'elle a consentis j'ai pu arriver à réaliser ce travail, ma très chère mère **HAMIDA**.*

*À mon très cher père **BACHIR**, pour les sacrifices qu'il a consenti pour mon éducation et pour l'avenir qu'il m'a cessé d'offrir.*

*À tous mes chers frères et sœurs.*

*À ces qui m'ont soutenu, encouragée, apprécie mes efforts et créés le milieu favorable, l'ambiance joyeuse et l'atmosphère joviale pour mon procuré ce travail, mes chers frères à dieu:*

**OULDKHAOUA MUSTAPHA, ABED RAHIM HALILALI,  
OUSSAMA RAHLI, KHLIL CHORFI WALID, MAZIGHI WALID**

*À mes chers amis et tous mes amis sans exception qui j'ai passée des bons moments avec-ils.*

*À toute ma promotion.*

*À tout ce qui j'aime et tout ce qu'ils m'aiment.*

*Toutes ces personnes que j'ai senties redoutables de leur dédier ce modeste travail en termes d'amour et de profonde gratitude.*

# REMERCIEMENTS

Le présent travail s'est déroulé au sein de Laboratoire de Recherches de Génie Civil (LRGC) de l'Université de Laghouat, et a été mené sous la direction de Mr. Benabed Bencha, Professeur à l'université de Laghouat. J'exprime ma plus sincère gratitude à lui pour m'avoir confié cette thèse et de l'avoir encadré. Je tiens à lui remercier pour sa disponibilité, son suivi, ses orientations, et ses conseils précieux qui m'ont permis d'achever ce travail de recherche. La confiance qu'il m'a témoignée, sa patience et son humanisme m'ont permis de supporter les difficultés rencontrées lors de la thèse.

Je voudrais également exprimer mes remerciements à mon co-directeur de thèse, le Professeur Khatib Jamal de l'université de Beyrouth pour sa disponibilité, pour ces conseils judicieux et le temps qu'il m'a accordés durant ces années de collaboration.

Je suis gré à Monsieur Goual Mohamed Sayeh, Professeur à l'Université de Laghouat, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury de ma thèse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Debieb Farid, Professeur à l'université de Médéa et Monsieur Boukendakdji Otmane, Professeur à l'université de Médéa et Monsieur Bouziani Tayeb, Professeur à l'université de Laghouat, d'avoir accepté d'examiner cette thèse et de participer au jury de soutenance.

Je tiens à remercier Dr. Abousnina Rajab (Université de Southern Queensland, Australie) pour ses conseils utiles et remarques pertinentes qui m'ont permis d'améliorer le présent travail.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur El-Hadj Kadri, Professeur à l'Université de Cergy-Pontoise, France, d'avoir encadré ce travail, de l'avoir dirigé et de l'avoir accompagné. J'ai beaucoup appris à son contact.

Un grand merci à Monsieur Gueddouda Mohamed Kamel, Professeur à l'université de Laghouat qu'il trouve ici mes plus vifs remerciements pour sa disponibilité, son soutien et d'avoir mis à disposition les moyens nécessaires au bon déroulement de cette thèse.

Je remercie également le directeur du Laboratoire de Recherches de Génie Civil de l'Université de Laghouat Monsieur Goual Idriss, Professeur à l'université de Laghouat, ainsi que tout le personnel qui a assuré le bon déroulement de la partie expérimentale de ce travail par la mise en disposition des matériaux et appareillage nécessaires.

Je tiens à remercier Monsieur Boukhelkhel Aboubakeur, Maitres de conférences à l'Université de Laghouat pour leurs conseils utiles et remarques pertinentes, leurs soutiens et leurs encouragements.

Je suis très reconnaissant à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu entretenir des discussions et échanger des idées, qui m'ont fait avancer dans ce travail de recherche. Qu'elles trouvent dans ces quelques mots mes sincères remerciements surtout Monsieur Belaidi Akram Salah Eddine, Professeur à l'Université de Laghouat.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues Zine El Abidine Laidani et Sahraoui Mohamed dont le soutien m'a été très précieux au cours de cette thèse. Que tous ceux que je n'ai pu citer leur nom veuillent bien m'excuser.

J'adresse mes remerciements aux responsables du Laboratoire de Recherches de Génie Civil de l'université de Laghouat pour avoir mis à ma disposition les appareils et les matériaux nécessaires à l'exécution des essais sont oublier leurs soutiens, leurs aides et leurs encouragements.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille pour son soutien indéfectible durant les années de thèse.

## ملخص

بفضل الإبتكارات التكنولوجية، تشكل الخرسانة المرصوفة ذاتيا (خ.م.ذ) من الناحية التقنية ثورة في مجال البناء. تكمن خصوصية هذه الخرسانة في خصائصها عند الحالة الطرية، حيث أنها تتميز بالسيولة الكبيرة في حين تبقى متجانسة. للحصول على هذه الخصائص، يستلزم تشكيل خليط يحتوي على كمية كبيرة من الإسمنت و المدنات الفائقة , مما يؤدي إلى زيادة تكلفة الخرسانة المرصوفة ذاتيا وانبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون في المحيط. في الوقت الحاضر، أصبحت المنتجات الصناعية الثانوية و النفايات في تزايد مستمر وفقا لإحتياجات الإنسان مما يضر بالبيئة. لقد أصبح قطاع الهندسة المدنية يتطلع مثل القطاعات الأخرى إلى التركيز على التنمية المستدامة بصفتها هدفا مهما. وهذا باستغلال هذه المواد للحصول على خرسانة خضراء.

الهدف من هذا العمل هو دراسة التأثير المشترك للميتاكاولين كإضافة أسمنتية بنسبة 5 ، 10 ، و 15% من وزن الإسمنت و النفايات الزجاجية كبديل للرمل بنسبة 10 ، 20 ، 30 ، 40 و 50% من وزن الرمل من أجل الحصول على خرسانة إيكولوجية وإقتصادية مرصوفة ذاتيا. أظهرت النتائج التجريبية أن إضافة مخلفات الزجاج بنسبة 50% و الميتاكاولين إلى الخرسانة المرصوفة ذاتيا يحسن الخصائص الريولوجية , وهذا التحسين مفيد لتخفيف من التأثير السلبي للميتاكاولين على تدفق خ.م.ذ. بالنسبة للحالة الصلبة، لاحظنا تحسنا للخصائص الميكانيكية مع إضافة 10% من الميتاكاولين . أما بخصوص ديمومة الخرسانة المرصوفة ذاتيا ، فقد إنخفضت خصائص هذا الأخير مثل: المسامية ، نفاذية الكلوريد و النفاذية للغاز مع إستبدال الرمل الطبيعي بمخلفات الزجاج. زيادة على ذلك، فإن إضافة الميتاكاولين يحسن ديمومة الخرسانة المدروسة و يقلل من الآثار السلبية لمخلفات الزجاج خاصة تفاعلات السيليكات. كما أن إضافة رمل الزجاج و الميتاكاولين إلى خليط الخرسانة المرصوفة ذاتيا يساهم بشكل إيجابي في تطوير الخرسانة الإيكولوجية.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المرصوفة ذاتيا، المنتجات الثانوية الصناعية، الرمل الزجاجي، الميتاكاولين،

ريولوجيا، المقاومة الميكانيكية ، الديمومة

## RESUME

Avec les innovations technologiques, le béton autoplaçant (BAP) donne une révolution du point de vue technique dans le domaine de construction. La particularité de BAP apparaît dans ses propriétés à l'état frais, qui se caractérise par une grande fluidité et stabilité. Pour répondre à ces exigences, la conception du BAP nécessite l'utilisation d'un dosage de ciment élevé et des superplastifiants (SP). Ceci, peut engendrer l'augmentation de coût du BAP et l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'environnement. De nos jours, les sous-produits et les déchets industriels augmentent en même temps que les besoins publics augmentent, ce qui accroît la charge environnementale. Le secteur du génie civil s'est tourné vers le développement durable en mettant l'accent sur les aspects environnementaux comme un objectif important.

Le présent travail a pour but d'étudier l'effet combiné de metakaolin (MK) comme ajout cimentaire à des taux de substitution de 5, 10 et 15% par rapport poids de ciment et les déchets de verre (DV) comme granulats fins (granulats de verre (GV)) à des niveaux de substitution de 10,20,30,40 et 50% par rapport poids de sable pour la mise au point d'un béton autoplaçant écologique et économique (Eco-BAP). Les résultats expérimentaux montrent que l'introduction de GV jusqu'à 50% dans les BAP avec MK améliore les propriétés rhéologiques, cette amélioration à effet bénéfique pour d'atténuer l'effet négatif de MK sur l'écoulement des BAP. À l'état durci, les propriétés mécaniques des BAP se sont améliorées avec l'ajout de 10% de MK quel que soit le pourcentage de GV utilisé. En terme de durabilité des BAP, tel que la porosité, la perméabilité aux ions chlorure et la perméabilité à gaz sont diminuées avec le remplacement du sable naturel par GV. Par contre, 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. Enfin, l'utilisation de la combinaison GV et MK dans les mélanges des BAP peut constituer une contribution positive dans la technologie des éco-bétons.

**Mots clés :** BAP ; Co-produits ; granulats de verre ; Métakaolin ; Rhéologie ; Résistance mécanique ; Durabilité.

## **ABSTRACT**

With technological innovations, self-compacting concrete (SCC) gives a technical revolution in the construction field. The particularity of SCC appears in their fresh state properties, and it must be characterized by high flowability and good stability. To achieve these requirements, of SCC mix design needs large amounts of Portland cement and superplasticizers (SP). This may cause the increasing of the SCC cost and the emission of CO<sub>2</sub> into the environment. Nowadays, by-products and wastes are increasing at the same time as public needs are increasing, which increases the environmental burden. The civil engineering sector has turned to sustainable development with an emphasis on environmental aspects as an important objective.

The main objective of work is to study the combined effects of metakaolin (MK) as cementitious materials at substitution ratios of 5, 10, and 15% by weight of cement and waste glass (WA) as fine aggregate (glass aggregate(GA)) at levels of 0, 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of sand for developing an ecological and economic self-compacting concrete (Eco-SCC).

The experimental results show that, the introduction of GA up to 50% into the SCC with MK improved rheological properties, this beneficial improvement helps to overcome the negative effect of MK in flowability of SCC. At the hardened state, the mechanical properties of the SCC improved with the addition of 10% MK whatever the percentage of GA incorporated. In terms of the durability of SCC, such as: porosity, chloride permeability and gas permeability are decreased with the replacement of natural sand by GA. In addition, the incorporation of MK improved the studied durability aspects and minimized the negative effect of GA, especially on the alkali-silica reaction (ASR) of the SCC. Finally, the combined use of GA and MK in mixtures of SCC can make a positive contribution to eco-friendly concretes technology.

**Key words:** SCC; by-product; Glass aggregates; Metakaolin; Rhéology; Mechanical strength, Durability.

## TABLE DES MATIERES

---

Remerciements .....	I
Résumé .....	III
Table des matières .....	VI
Liste des figures .....	XIII
Liste des tableaux .....	XVIII
Liste des Abréviations.....	XIX
INTRODUCTION GENERALE .....	1

### CHAPITRE I

#### ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON .....	6
I.1. INTRODUCTION .....	6
I.2. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CO- PRODUIT ET DECHET .....	7
I.2.1. Production de ciment et son émission de CO <sub>2</sub> dans le monde .....	8
I.2.2. Production de ciment et son émission de CO <sub>2</sub> en l'Algérie .....	10
I.3. LE METAKAOLIN COMME AJOUT CIMENTAIRE DANS LE BETON .....	11
I.3.1. Obtention de metakaolin .....	11
I.3.2. Effet de métakaolin sur l'ouvrabilité et le temps de prise.....	12
I.3.3. Effet de métakaolin sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers .....	15
I.3.3.1 Résistance à la compression .....	15
I.3.3.2. Résistance à la traction .....	21
I.3.3.3. Module d'élasticité.....	22

## TABLE DES MATIERES

---

<b>I.3.4. Effet de métakaolin sur la durabilité des bétons/mortiers</b> .....	<b>23</b>
I.3.4.1 Absorption d'eau.....	23
I.3.4.2. Retrait de séchage.....	23
I.3.4.3. Résistance à la pénétration aux ions chlorure.....	24
I.3.4.4. Réaction alcalis silice.....	25
I.3.4.5. Attaque des sulfates.....	26
<b>I.4. BETON A BASE DES GRANULATS DE VERRE RECYCLE</b> .....	<b>27</b>
I.4.1. Source de verre.....	28
I.4.2. Recyclage des déchets de verre dans le monde.....	29
I.4.3. Recyclage des déchets de verre dans l'Algérie.....	29
I.4.4. Influence de granulats de verre sur l'ouvrabilité.....	30
I.4.5. Influence de granulats de verre sur les résistances mécaniques.....	33
I.4.5.1 Résistance à la compression.....	33
I.4.5.2. Résistance à la traction.....	36
I.4.5.3. Densité.....	37
I.4.5.4. Module d'élasticité.....	38
<b>I.4.6. Influence de granulats de verre sur Les propriétés de durabilité des bétons</b> .....	<b>39</b>
I.4.6.1. Absorption d'eau.....	39
I.4.6.2. Retrait de séchage.....	40
I.4.6.3. Réaction alcali-silice.....	42
I.4.6.4. Résistance à la pénétration aux ions chlorure.....	44
I.4.6.5. Attaque de sulfate.....	45
I.4.6.6. Résistance aux gels-dégels.....	46
I.4.6.7. Carbonatation.....	46

## TABLE DES MATIERES

---

<b>I.5. BETON AUTOPLAÇANT.....</b>	<b>47</b>
I.5.1. Caractéristique des BAP à l'état frais.....	47
<b>I.5.2. Formulations et Compositions des BAP.....</b>	<b>52</b>
I.5.2.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon).....	52
I.5.2.2. Formulation LCPC (France).....	54
I.5.2.3. Formulation CBI modifiée.....	54
I.5.2.4. Formulation japonaise .....	55
I.5.3. Application des BAP.....	56
I.5.4. Application des BAP en l'Algérie.....	57
<b>I.6 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>65</b>

## CHAPITRE II

### MATERIAUX ET ESSAIS

<b>CHAPITRE II MATERIAUX ET ESSAIS.....</b>	<b>68</b>
<b>II.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>68</b>
<b>II.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE .....</b>	<b>68</b>
II.2.1. Ciment.....	68
II.2.2. Metakaolin.....	68
II.2.3. Sable.....	72
II.2.4. Gravier .....	72
II.2.5. Superplastifiant.....	73
II.2.6. Granulats fins issus par des déchets du verre TRC.....	73
<b>II.3. FORMULATION.....</b>	<b>74</b>
II.3.1. Formulation du MAP.....	75

## TABLE DES MATIERES

---

II.3.2. Formulation du BAP.....	77
<b>II.4. PROCEDURES DE MALAXAGE.....</b>	<b>79</b>
II.4.1. MAP.....	79
II.4.2. BAP.....	79
<b>II.5. ESSAIS SUR MAP A L'ETAT FRAIS.....</b>	<b>80</b>
II.5.1. Essais au Mini-Cône.....	80
II.5.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) .....	80
II.5.3. Essais au rhéomètre.....	81
<b>II.6. ESSAIS SUR MAP A L'ETAT DURCI.....</b>	<b>84</b>
II.6.1. Résistance à la compression.....	84
II.6.2. Retrait.....	84
II.6.3. Résistance à la haute température.....	84
II.6.4. Absorption d'eau par immersion total.....	85
II.6.5. Réaction alcalis-silice .....	85
<b>II.7. ESSAIS SUR BAP A L'ETAT FRAIS.....</b>	<b>86</b>
II.7.1 Essais d'étalement et T <sub>50</sub> .....	86
II.7.2 Essai d'entonnoir en V (V-funnel) .....	86
II.7.3 Essai de La Boîte En L (L-Box) .....	87
II.7.4 Essai de stabilité au tamis.....	87
<b>II.8 ESSAIS SUR BAP A L'ETAT DURCIS.....</b>	<b>88</b>
II.8.1. Résistance mécanique.....	88
II.8.2 Essai de vitesse d'auscultation sonique (VAS) .....	88
II.8.3. Essai de ségrégation statique.....	89
II.8.4. Essai de Porosité.....	89

## TABLE DES MATIERES

---

II.8.5. Essai de Perméabilité à gaz.....	90
II.8.6. Essai de Perméabilité aux ions chlorure.....	92
II.8.7. Essais d'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) .....	93
<b>II.9 SYNTHÈSE .....</b>	<b>94</b>

## CHAPITRE III

### EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS

<b>CHAPITRE III : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS .....</b>	<b>96</b>
<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>96</b>
<b>III.2. ETUDES DES MAP.....</b>	<b>96</b>
III.2.1. Optimisation des rapports S/M et SP/L.....	96
III.2.2. Effet du superplastifiant sur les MAP.....	98
III.2.2.1 Etalement au mini-cône.....	98
III.2.2.2 Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V.....	101
<b>III.2.3. Effet du MK et GV sur les MAP.....</b>	<b>103</b>
III.2.3.1 <i>Etalement au mini-cône.....</i>	<i>103</i>
III.2.3.2 <i>Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V.....</i>	<i>104</i>
<b>III.3. Etude rhéologique des MAP.....</b>	<b>105</b>
III.3.1. Seuil de cisaillement.....	105
III.3.2. Viscosité plastique.....	107
III.3.3. Corrélation entre les propriétés rhéologiques.....	108
<b>III.4. ETUDES DES BAP.....</b>	<b>110</b>
III.4.1. Etalement et temps T50 au cône d'Abrams.....	110
III.4.2. Temps d'écoulement en entonnoir V.....	113

III.4.3 Essai de la Boîte en L (L-Box) .....	115
III.4.4. Stabilité au Tamis.....	116
III.5. SYNTHÈSE.....	119

## CHAPITRE IV

### EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI

CHAPITRE IV : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI .....	121
IV.1. INTRODUCTION.....	121
IV.2. ETUDE DES MAP.....	121
IV.2.1. Résistance à la compression.....	121
IV.2.2. Absorption d'eau.....	125
IV.2.3. Retrait.....	127
IV.2.4. Réaction alcali silice.....	129
IV.2.5. Résistance au feu.....	133
IV.2.5.1. Perte de résistance.....	133
IV.2.5.2. Perte de masse.....	135
IV.3. ETUDE DES BAP.....	135
IV.3.1. Résistance à la compression.....	135
IV.3.2. Résistance à la flexion.....	139
IV.3.3. Vitesse d'auscultation sonore.....	141
IV.3.4. Porosité.....	143
IV.3.5. Perméabilité à gaz.....	147
IV.3.6. Pénétration aux ions chlorures .....	148
IV.3.7. Résistance à la ségrégation statique.....	151

## TABLE DES MATIERES

---

<b>IV.4. Corrélations entre les propriétés du béton autoplaçant.....</b>	<b>153</b>
<b>IV.4.1. Corrélation entre la résistance à la compression et VAS.....</b>	<b>154</b>
<b>IV.4.2. Corrélation entre résistance à la compression et La porosité.....</b>	<b>155</b>
<b>IV.4.3. Corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration aux ions chlorures</b>	<b>156</b>
<b>IV.4.4. Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité.....</b>	<b>157</b>
<b>IV.4.5. Corrélation entre la perméabilité à gaz chlorures et la porosité.....</b>	<b>158</b>
<b>IV.5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BAP.....</b>	<b>159</b>
<b>IV.6. SYNTHÈSE.....</b>	<b>163</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>165</b>
Perspectifs .....	168
Références bibliographiques .....	170
Annexe .....	196
Production scientifique .....	205

**CHAPITRE I**

**ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS**

**L'INDUSTRIE DU BETON**

<i>Figure I.1: Comparaison de production de ciment et l'acier par Année .....</i>	8
<i>Figure I. 2: Évolution du marché mondial du ciment .....</i>	9
<i>Figure I.3: Émission de CO<sub>2</sub> à cause de production du ciment .....</i>	9
<i>Figure I.4: La production du ciment en Algérie.....</i>	10
<i>Figure I.5: Effet de MK sur l'ouvrabilité des bétons/mortiers à partir des nombreuses études.....</i>	14
<i>Figure I.6: Effet de la teneur en MK sur le temps de prise initiale et finale des mélanges de mortier.....</i>	15
<i>Figure I.7: Optimum de MK sur la résistance à la compression des bétons/mortiers à partir des nombreuses études.....</i>	20
<i>Figure I.8: Coefficient d'absorption d'eau en fonction de MK .....</i>	23
<i>Figure I.9: Test de pénétration de chlorure avec et sans ajouts de MK .....</i>	25
<i>Figure I.10 : Différent type des déchets de verre.....</i>	28
<i>Figure I.11 : diamètre de l'étalement de mortier avec différent % de verre TRC en fonction de l'évolution de temps .....</i>	30
<i>Figure I.12 : l'ouvrabilité de béton à partir de nombreuses études.....</i>	32
<i>Figure I.13 : Effet de taille des granulats de verre sur la Résistance à la compression.....</i>	34
<i>Figure I.14 : les résultats de résistance à la compression à partir de nombreuses études .....</i>	35
<i>Figure I.15 : les résultats de résistance à la traction à partir de nombreuses études .....</i>	36
<i>Figure I.16 : Densité à l'état durci en fonction de type et % du verre.....</i>	37
<i>Figure I.17 : Module d'élasticité avec différent % de verre.....</i>	38
<i>Figure I.18 : Absorption d'eau du mortier en fonction de type et % du verre.....</i>	40

## **LISTE DES FIGURES**

---

<i>Figure I.19: Retrait de séchage de mortier avec différent % de verre TRC.....</i>	<b>41</b>
<i>Figure I.20: La particule de verre affectée par la RAS montre la formation de gel intra-particulaire dans le mortier après 14 jours Maraghechi.....</i>	<b>42</b>
<i>Figure I.21: L'effet de réaction alcali silice dans le béton/mortier .....</i>	<b>43</b>
<i>Figure I.22: L'effet de cendre volante sur la RAS.....</i>	<b>43</b>
<i>Figure I.23: Perméabilité de béton en fonction de % du verre .....</i>	<b>44</b>
<i>Figure I.24: Perte de masse du béton de GV contenu dans une solution de sulfate.....</i>	<b>45</b>
<i>Figure I.25: Différents essais pour la caractérisation des BAP.....</i>	<b>51</b>

## **CHAPITRE II**

### **MATÉRIAUX ET ESSAIS**

<i>Figure II.1: Analyse minéralogique par DRX (a) kaolin,(b) MK.....</i>	<b>70</b>
<i>Figure II.2: SEM observation (a) ciment, (b) MK.....</i>	<b>71</b>
<i>Figure II.3: Analyse granulométrique des granulats utilisée .....</i>	<b>73</b>
<i>Figure II.4: Les procédures de traitement verre TRC.....</i>	<b>74</b>
<i>Figure II.5: Séquence de malaxage du BAP .....</i>	<b>80</b>
<i>Figure II.6: Description de Mélange témoin ... ..</i>	<b>80</b>
<i>Figure II.7: Rhéomètre utilisé et son système d'acquisition .....</i>	<b>82</b>
<i>Figure II.8: Profil de vitesse .....</i>	<b>83</b>
<i>Figure II.9: Mesure de la vitesse d'auscultation sonique .....</i>	<b>88</b>
<i>Figure II.10: Essai de l'essai de porosité .....</i>	<b>90</b>
<i>Figure II.11: Description l'essai de perméabilité aux gaz.....</i>	<b>91</b>
<i>Figure II.12: Description l'essai de perméabilité aux ions chlorure.....</i>	<b>92</b>

**CHAPITRE III**

**EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS**

<i>Figure III.1. Étalement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base des granulats de verre .....</i>	<b>99</b>
<i>Figure III.2. Étalement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de MK .....</i>	<b>99</b>
<i>Figure III.3. Étalement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de combinaison de GV et MK ...</i>	<b>100</b>
<i>Figure III.4. Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de MK.....</i>	<b>101</b>
<i>Figure III.5. Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de GV.....</i>	<b>102</b>
<i>Figure III.6. Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de GV et MK .....</i>	<b>102</b>
<i>Figure III.7. Variation de l'étalement des MAP à base de MK et GV .....</i>	<b>103</b>
<i>Figure III.8. Évolution du temps d'écoulement des MAP à base de MK et GV .....</i>	<b>105</b>
<i>Figure III.9. Influence de la combinaison de MK et GV sur le seuil de cisaillement de différents MAP ....</i>	<b>106</b>
<i>Figure III.10. Influence de la combinaison de MK et GV sur la viscosité de différents MAP .....</i>	<b>107</b>
<i>Figure III.11. Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement .....</i>	<b>109</b>
<i>Figure III.12. Corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement .....</i>	<b>110</b>
<i>Figure III.13. Étalement en fonction de MK et GV pour les différents BAP .....</i>	<b>111</b>
<i>Figure III.14. Évolution du temps d'écoulement <math>T_{50}</math> en fonction de MK et GV pour les différents BAP ....</i>	<b>112</b>
<i>Figure III.15. Évolution du temps d'écoulement en fonction de MK et GV pour les différents BAP .....</i>	<b>114</b>
<i>Figure III.16. corrélation entre le temps d'écoulement <math>T_{50}</math> et TV-F .....</i>	<b>114</b>
<i>Figure III.17. Rapport <math>H_2/H_1</math> en fonction de MK et GV pour les différents BAP .....</i>	<b>116</b>
<i>Figure III.18. Indice de ségrégation en fonction de MK et GV pour les différents BAP .....</i>	<b>117</b>

**CHAPITRE IV****EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI**

<i>Figure IV.1. Résistance à la compression des mortiers en fonction de type de MK et GV.....</i>	<b>122</b>
<i>Figure IV.2. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base 5MK+50GV .....</i>	<b>124</b>
<i>Figure IV.3. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base 10MK+50GV .....</i>	<b>124</b>
<i>Figure IV.4. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base 15MK+50GV.....</i>	<b>125</b>
<i>Figure IV.5. Évolution de l'absorption pour les différents MAP.....</i>	<b>126</b>
<i>Figure IV.6. Retrait en fonction de type de MK et GV .....</i>	<b>128</b>
<i>Figure IV.7. observations par le MEB des mortiers avec 50% GV .....</i>	<b>129</b>
<i>Figure IV.8. RAS pour les différents MAP .....</i>	<b>131</b>
<i>Figure IV.9. Examen au MEB pour le MAP à base 5MK+50GV à base après RAS.....</i>	<b>132</b>
<i>Figure IV.10. Examen au MEB pour le MAP à base 10MK+50GV à base après RAS.....</i>	<b>132</b>
<i>Figure IV.11. RCR pour les différents MAP.....</i>	<b>134</b>
<i>Figure IV.12. Perte de masse pour les différents MAP avant et après le feu.....</i>	<b>135</b>
<i>Figure IV.13. Résistance à la compression des différents BAP.....</i>	<b>138</b>
<i>Figure IV.14. Résistance à la flexion des différents BAP.....</i>	<b>140</b>
<i>Figure IV.15. VAS des différents BAP.....</i>	<b>142</b>
<i>Figure IV.16: Porosité des différents BAP.....</i>	<b>145</b>
<i>Figure IV.17. Examen au MEB pour le MAP à base 5MK+50GV.....</i>	<b>145</b>
<i>Figure IV.18. Examen au MEB pour le MAP à base 10MK+50GV.....</i>	<b>146</b>
<i>Figure IV.19. Examen au MEB pour le MAP à base 15MK+50GV.....</i>	<b>146</b>
<i>Figure IV.20. Perméabilité à gaz des différents BAP.....</i>	<b>148</b>
<i>Figure IV.21. Pénétration des ions chlorures.....</i>	<b>150</b>
<i>Figure IV.22. Examen visuel de la ségrégation statique des différents BAP(a).....</i>	<b>152</b>

## LISTE DES FIGURES

---

<i>Figure IV.22. Examen visuel de la ségrégation statique des différents BAP (b).....</i>	<b>153</b>
<i>Figure IV.23.corrélation établie entre la résistance à la compression et VAS.....</i>	<b>154</b>
<i>Figure IV.24.corrélation établie entre la résistance à la compression et la porosité.....</i>	<b>155</b>
<i>Figure IV.25.Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité aux ions chlorures.....</i>	<b>156</b>
<i>Figure IV.26. Corrélacion entre la porosité et la perméabilité aux ions chlorures.....</i>	<b>157</b>
<i>Figure IV.27. Corrélacion entre la porosité et la perméabilité à gaz.....</i>	<b>158</b>

**CHAPITRE I**

**ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS**

**L'INDUSTRIE DU BETON**

<i>Tableaux I.1 : la quantité des déchets de verre et le taux de recyclage pour différents pays du monde.....</i>	<b>29</b>
<i>Tableaux I.2 : L'ouvrabilité des mélanges de BAP.....</i>	<b>31</b>
<i>Tableau I.3 recommandation des essais du BAP.....</i>	<b>50</b>

**CHAPITRE II**

**MATÉRIAUX ET ESSAIS**

<i>Tableau II.1. Composition chimique et propriétés physiques de ciment et MK.....</i>	<b>69</b>
<i>Tableau II.2. Propriétés physiques d'identification des granulats utilisés.....</i>	<b>72</b>
<i>Tableau II.3. Composition des différentes MAP étudiés dans un 1 m<sup>3</sup>.....</i>	<b>76</b>
<i>Tableau II.4. Composition des différentes BAP étudié dans un 1 m<sup>3</sup>.....</i>	<b>78</b>
<i>Tableau II.5. Classification du béton selon la perméabilité aux gaz.....</i>	<b>91</b>
<i>Tableau II.6. Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure .....</i>	<b>93</b>

**CHAPITRE III**

**EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS**

<i>Tableau II.1. Résultats d'étalement sur MAPT pour différents % de SP et S/M.....</i>	<b>97</b>
<i>Tableau III.2. Principaux effets observés suite aux essais sur MAP et BAP aux états frais.....</i>	<b>118</b>

**CHAPITRE IV**

**EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI**

<i>Tableau IV.1. Impact environnemental des mélanges des BAP sur les émissions de CO<sub>2</sub> pour 1 m<sup>3</sup> de BAP</i>	<b>160</b>
--	------------

## LISTE DES TABLEAUX

---

<i>Tableau IV.2. Impact environnemental des mélanges des BAP sur l'énergie pour 1 m<sup>3</sup> de BAP.....</i>	<b>161</b>
<i>Tableau IV.3. Principaux effets observés suite aux essais sur MAP et BAP aux essais de durabilité.....</i>	<b>162</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS ET NOMENCLATURES

**ASTM** : American society for testing materials;

**(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** : alumine ;

**BAN** : Bétons autonivellants ;

**BAP** : Béton autoplaçant ;

**BAPGV** : Béton autoplaçant à base de granulats de verre ;

**BAPMK** : Béton autoplaçant à base de Métakaolin ;

**BAPMKGV** : Béton autoplaçant à base de métakaolin et granulats de verre ;

**BAPT** : Béton autoplaçant Témoin ;

**BFM** : Bétons de fibres métalliques ;

**BGR** : Béton de granulats recyclés ;

**BHP** : Bétons hautes performances ;

**BO** : Bétons ordinaires.

**BV** : Bétons vibrés ;

**C (CaO)** : oxyde de calcium ou chaux vive ;

**C-S-H** : silicate de calcium hydraté ;

**C<sub>3</sub>A (3CaO,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** : aluminat tricalcique ;

**C<sub>3</sub>S (3CaO,SiO<sub>2</sub>)** : silicate tricalcique ou « alite » ;

**C<sub>2</sub>S (2CaO,SiO<sub>2</sub>)** : silicate bicalcique ou « bélite » ;

**C<sub>4</sub>AF (4CaO,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** : aluminoferrite tétracalcique ;

**CaCO<sub>3</sub>** : calcite ;

**CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O** : gypse secondaire ;

**C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O** : ettringite secondaire ;

**CaSO<sub>4</sub>** : sulfate de calcium ;

## LISTE DES ABEVIATIONS ET NOMENCLATURES

---

**CaCl<sub>2</sub>** : chlorures de calcium ;

**F (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**: oxyde ferrique (hématite) ;

**H (H<sub>2</sub>O)**: eau ;

**K (K<sub>2</sub>O)**: oxyde de potassium ;

**C.P.A** : Ciment Portland artificiel ;

**CV** : Cendre volante ;

**d** : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

**D<sub>max</sub>** : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire ;

**DRX** : diffractométrie aux rayons X ;

**E/C** : le rapport Eau / Ciment ;

**E.S.V** : Équivalent de sable à vue ;

**E/L** : le rapport Eau / Liant ;

**GV** : Granulats de verre ;

**G/S** : Gravillons / sable ;

**MAP** : Mortier autoplaçant

**MAPT** : Mortier autoplaçant témoin ;

**MEB** : Microscope électronique à balayage

**MK** : Métakaolin ;

**PZ** : Pozzolane

**PM** : Poudre de marbre

**R<sub>c</sub>** : Résistance à la compression ;

**R<sub>f</sub>**: Résistance à la flexion ;

**R<sub>t</sub>** : Résistance à la traction ;

**S (SiO<sub>2</sub>)** : silice ;

**SSP** : surface spécifique d'une poudre ;

## LISTE DES ABEVIATIONS ET NOMENCLATURES

---

**S/G** : le rapport sable sur granulats ;

**S/M** le rapport sable sur mortiers ;

**SP** : Superplastifiant ;

**SP/L : le rapport** : superplastifiant/liant ;

**T** : le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes ;

**VTRC** : verre de tube au rayon de tube cathodique ;

**V** : Volume des vides du mélange granulaire ;

**$\rho$**  : Densité du constituant exprimée en g/cm<sup>3</sup>;

**ZTI** : Zone de transition interfaciale.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Le besoin croissant en matériaux de construction nous mène vers un épuisement des ressources naturelles. Il est désormais essentiel de réfléchir dans une logique de développement durable [1]. En effet, l'utilisation, aussi souvent que possible, de matériaux alternatifs (y compris de sous-produits marginaux ou de matériaux recyclés) peut permettre de pallier cette raréfaction de matériaux de construction traditionnels. Certains sous-produits industriels comme les cendres volantes, les laitiers de hauts-fourneaux ou la fumée de silice montrent depuis quelques décennies un grand potentiel d'utilisation en remplacement, dans une certaine proportion, du ciment Portland [2]. Les recherches à ce sujet indiquent, en effet, qu'il est possible de les introduire sans risque dans un béton, améliorant même bien souvent ses propriétés mécaniques et sa durabilité [3].

Le béton est actuellement le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Ce dernier consomme des quantités énormes de granulats et de ciment, le processus d'extraction de granulats et de fabrication de ciment pose de sérieux problèmes environnementaux, tels que les émissions élevées de CO<sub>2</sub> et la forte consommation d'énergie [4]. Pour cela, il est impératif de promouvoir une économie circulaire dans le domaine de la construction, que ce soit par la recherche ou bien par l'innovation. À l'heure actuelle et à l'avenir, les nouvelles techniques contribueront à réduire la pollution de l'environnement en recyclant et valorisant les déchets et sous-produits industriels dans le béton sous forme de granulats ou comme ajouts cimentaires afin de minimiser leur impact néfaste sur la nature. C'est pourquoi l'industrie du béton innovant est intéressée pour réduire la quantité des déchets solides, qui occupent désormais un espace important dans l'environnement, et diminuer la consommation des matières premières en remplaçant les matériaux primaires de béton par des matériaux secondaires ou recyclés [5, 6].

Les déchets électriques et les équipements électroniques (DEEE), tels que les tubes à rayons cathodiques (TRC) utilisés pour les moniteurs d'affichage, constituent une source de

déchets qui ayant des conséquences désastreuses pour l'environnement [7]. Ces déchets peuvent poser des problèmes et avoir un impact significatif sur la santé publique et l'environnement naturel en raison de la toxicité de la teneur en plomb dans le verre TRC. Il est donc impératif que ces déchets soient traités et éliminés de manière à atténuer les conséquences néfastes. Récemment, des chercheurs ont appris à réutiliser les tubes cathodiques comme matière première pour d'autres produits en verre. De nombreux chercheurs affirment que les déchets de verre recyclés peuvent être utilisés comme remplacements du sable naturel dans le mortier et le béton.

**A**ctuellement les ajouts cimentaires, tels que les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles, le laitier, ainsi que la fumée de silice ont ouvert la voie à une forme de béton plus durable. Non seulement ces matériaux réduisent la nécessité de plus de ressources brutes, mais ils renforcent également l'intégrité structurale et la durabilité du béton. Le métakaolin (MK) est un matériau pouzzolanique obtenu par calcination de l'argile kaolinite à une température comprise entre 500 °C et 800 °C. Des nombreux chercheurs ont rapporté que l'ajout de MK au mélange réduisait sa maniabilité et que, par conséquent, un rapport eau/ciment ou des superplastifiants (SP) supplémentaires pour attendre généralement l'ouvrabilité souhaitée [8], cette augmentation est un facteur négatif concernant le coût du béton autoplaçant (BAP).

**L'**avènement de BAP marque une nouvelle étape dans l'histoire de la technologie du béton, et répandre à plusieurs intérêts techniques dans le domaine de la construction civile et industrielle, 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. Le résultat final est une qualité de béton sans ségrégation et ressuage. Les inconvénients associés aux ce type de béton sont liés à son coût, car des grands volumes de ciment Portland et d'adjuvants chimiques sont nécessaires pour assurer une meilleure maniabilité.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse, l'accent sera mis d'un point de vue écologique et économique. L'objectif de notre investigation, en premier lieu est de produire un éco-béton autoplaçant à base des co-produits et déchets industriels plus particulièrement en tant que granulats et ciment, afin de réduire l'extraction des granulats, les émissions de CO<sub>2</sub> et le coût de la construction. En deuxième lieu, ce travail vise à étudier les propriétés rhéologiques, physiques, mécaniques et la durabilité à moyen et long terme d'un BAP incorporant du verre de tube cathodique comme granulats fins et du métakaolin comme ajout cimentaire.

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces préoccupations, une campagne expérimentale a été élaborée et présentée dans ce manuscrit qui comprend quatre chapitres plus une introduction générale :

Le premier chapitre : est consacré à l'état de l'art sur l'utilisation des granulats de verre (GV) et MK dans l'industrie du béton, dans laquelle les propriétés de béton de verre recyclé et leur effet sont présentés sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité de béton. Nous décrirons ensuite l'influence de métakaolin sur le comportement de béton à l'état frais et à l'état durci. Le chapitre est finalisé par un aspect sur les propriétés des BAP à l'état frais, puis on s'intéresse aux applications des BAP dans le monde et en Algérie. Nous exposant ensuite les principales méthodes de formulation du BAP et la relation qui existe entre le BAP et son mortier autoplaçant (MAP).

Le deuxième chapitre : regroupe les méthodes de caractérisation utilisées pour qualifier les constituants, les mélanges et les différentes compositions et essais réalisés sur les BAP à l'état frais et à l'état durci.

Le troisième chapitre : présente l'analyse et la discussion des résultats des différents essais rhéologiques. Ce chapitre est lié au avec le deuxième chapitre pour la validation de la méthode de formulation des différentes gammes de BAP à base de MK et GV, et met aussi en avant des relations entre les propriétés à l'état frais évaluées par des essais

empiriques et celles mesurées par des essais au rhéomètre afin de comprendre mieux le comportement rhéologique des BAP réalisés avec différents matériaux.

**L**e dernier chapitre : traite les propriétés à l'état durci. Dans une première partie il est mis en évidence l'effet de MK et le GV sur la résistance en compression, retrait, réaction alcalis silice, la résistance à haute température et la porosité. La deuxième partie est consacrée aux tests de durabilité, deux paramètres de transfert dans les milieux poreux ont été étudiés : la perméabilité aux gaz, la diffusion des ions chlorure. Le manuscrit s'achève par la fin une étude écologique des BAP étudiés.

**E**nfin, le manuscrit s'achève par une conclusion générale et des perspectives dans le futur on rappelant les principaux résultats obtenus sur la faisabilité de BAP en substituant le ciment par le métakolin et le sable par les granulats de verres.

**CHAPITRE I**

**ÉTAT DE L'ART SUR**

**L'UTILISATION DES GV ET LE MK**

**DANS L'INDUSTRIE DU BETON**

# CHAPITRE I

## ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK

### DANS L'INDUSTRIE DU BETON

#### I.1 INTRODUCTION

Les co-produits issus de filières industrielles diverses restent trop peu valorisés et sont encore trop souvent envoyés en décharge. Le matériau béton peut contribuer de manière positive à l'économie circulaire en incorporant des co-produits et déchets lorsque les caractéristiques de ces derniers le permettent. À ce stade, on obtient des matériaux aux performances techniques, sanitaires et de durabilité pouvant être équivalentes à celles des bétons traditionnels. Lors de la production du béton, ses constituants traditionnels (granulats, matières constitutives du liant) peuvent être partiellement remplacés par des co-produits, mais la question qui se pose qu'est-ce qu'un co-produit ? « Un co-produit c'est une matière intentionnelle et inévitable créée au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit final (papier, pièce en fonte...) ». Cependant, on ne peut pas envisager de mettre n'importe quel co-produit dans n'importe quel béton sans étude préalable. Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés, avec plusieurs types qui sont apparus ces dernières années ; les bétons à hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants et autonivellants (BAP et BAN), les bétons de fibres (BF) et les bétons innovants (BI). La créativité des architectes d'une part, l'évolution des réalités de la construction d'autre part, sont les grands enjeux qui expliquent et justifient les immenses progrès du matériau béton au cours de ces dernières années. Les bénéfices s'observent à tous les niveaux, jusqu'au coût global de la construction.

Dans ce chapitre on a présenté une synthèse bibliographique dans lequel il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail à savoir l'utilisation de metakaolin (MK) et les granulats de verre (GV) dans l'industrie de béton. Ce chapitre, servira par la suite application des BAP dans le monde et en Algérie.

## I.2. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CO- PRODUITS ET DECHETS

La demande de matières premières augmente en raison du développement technologique et économique. Après des décennies de production, le béton qui consomme une grande partie de ces matériaux reste le matériau le plus utilisé dans l'industrie de la construction à ce jour [9]. Par conséquent, la question qui se pose est jusqu'à quand les matières premières diminuant continuellement suffiront-elles? Il est impossible de déterminer le volume des ressources naturelles ni la durée pendant laquelle, elles peuvent être consommées sans être épuisées puisqu'elles ne sont pas renouvelables. Ainsi, les experts s'attendent à ce que le problème du déséquilibre entre la demande de ces matériaux et leur volume s'aggrave, il est donc nécessaire de trouver une alternative [10]. 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 du flux de déchets solides non dégradables, pour faire face aux problèmes de durabilité, d'énergie et d'environnement à la fois.

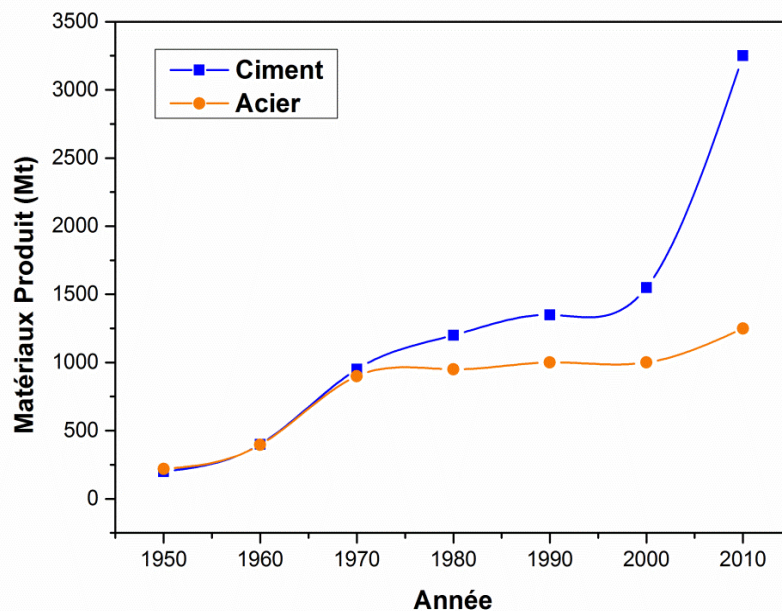
L'utilisation des déchets dans la construction a appelé à de plus grands débats sur la satisfaction des conditions d'économie d'énergie qui en résultent et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, pour répondre aux exigences environnementales. Les économies d'énergie associées au processus de recyclage sont similaires à la production de granulats broyés et la demande d'énergie sera similaire pour les deux procédés. Il est généralement admis que les matériaux de construction les plus utilisés actuellement ainsi que les méthodes de construction ne sont pas durables, avec des impacts environnementaux importants tels que la consommation d'énergie, la pollution, les poussières, l'épuisement des ressources naturelles et les émissions de CO<sub>2</sub>. Dans la production de béton, le principal responsable de la production du CO<sub>2</sub> est l'utilisation de ciment Portland ordinaire avec un taux de contribution à peu près équivalent à 80-90% [11]. Selon Viviana et al [12], l'industrie du ciment est responsable de 5% des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde. Plus d'attention devrait être accordée au choix des matériaux [13]. Meddah [14] a souligné que l'augmentation de la consommation d'énergie de toutes les sources pourrait même

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

contribuer au changement climatique mondial. Il a également révélé que la réduction des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> pourrait être réalisée en sélectionnant des matériaux ayant un impact environnemental plus faible [14].

### I.2.1. Production de ciment et son émission de CO<sub>2</sub> dans le monde

Au cours des 76 dernières années, la quantité de ciment produite a augmenté de près de 34 fois [15, 16], tandis que la population a augmenté de moins de 3 fois [15, 17]. Ce taux de croissance est beaucoup plus élevé que d'autres produits tels que l'acier (Figure I.1) [18].



*Figure I.1: Comparaison de production de ciment et l'acier par année [18].*

En 2015, la masse totale de ciment produite était de 4,6 milliards des tonnes [17]. La figure I.2 présentent l'évolution du marché mondial du ciment, il est possible, et peut-être même sur le plan social, que la production aux futures dépasse ces valeurs [19]. Cette augmentation engendre avec l'augmentation de population et ses besoins de construction. La plupart des problèmes environnementaux liés à la production du clinker, et surtout les

# CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), un important gaz à effet de serre (GES), qui en découle [20]. La figure I.3 illustre l'émission de carbone dans le monde suite à la production de ciment [21].

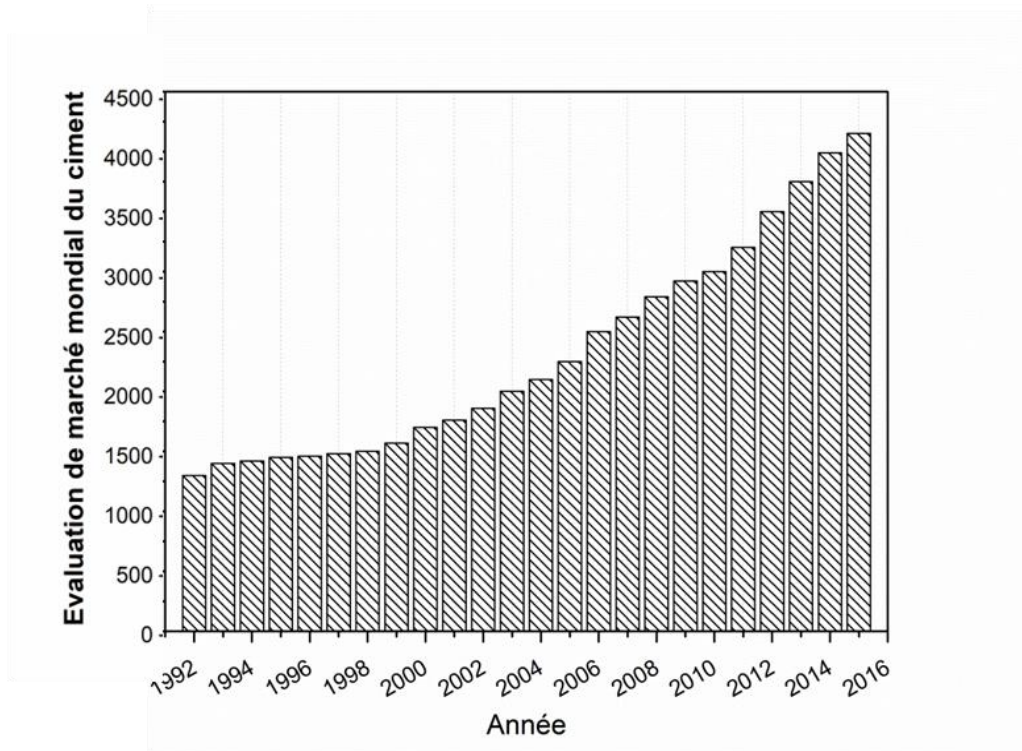


Figure I. 2: Évolution du marché mondial du ciment [17, 19].

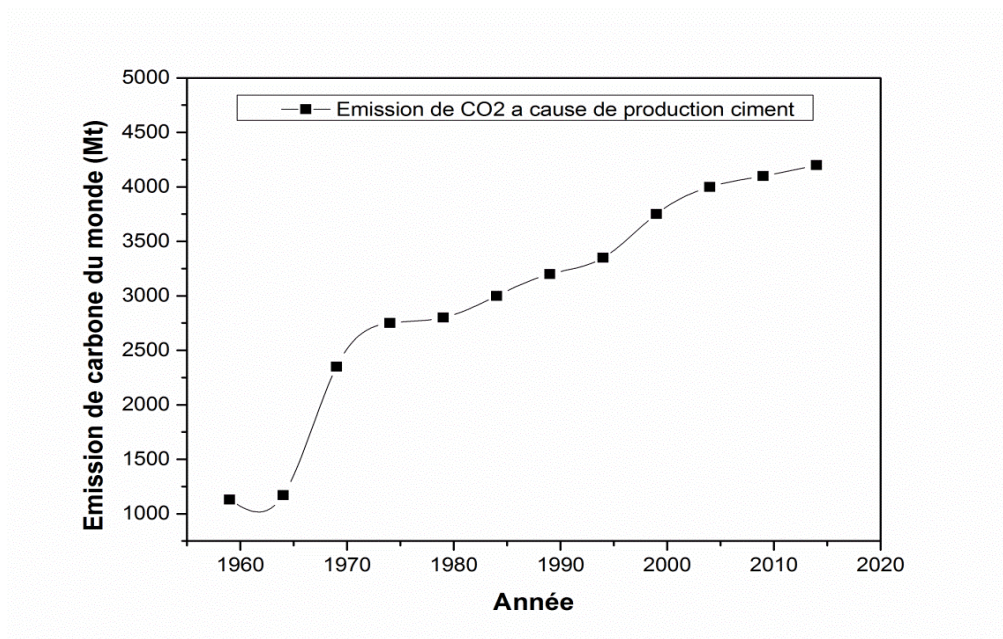


Figure I.3: Émission de CO<sub>2</sub> à cause de production du ciment [21].

### I.2.2. Production de ciment et son émission de CO<sub>2</sub> en l'Algérie

La production nationale de ciment devrait dépasser la barre des 25 millions de tonnes en 2017, selon le ministère de l'Industrie et des Mines sur la situation de la filière de production de ciment en Algérie, la production nationale s'établissait à 17.5 millions de tonnes en 2010 et à 22 millions de tonnes en 2016 [22]. La capacité de production de l'Algérie, qui compte 17 cimenteries en service, est passée de 20 à 25 millions de tonnes entre de 2015 et 2017 grâce à la réception de plusieurs projets d'extension ou de nouvelles cimenteries. Parmi ces projets figurent l'extension depuis janvier 2017 de la cimenterie d'Ain El Kebira à Sétif, du groupe GICA, d'une capacité de 2 millions de tonnes par an, la réception de la cimenterie CILAS à Biskra avec une capacité additionnelle de 2.7 millions de tonnes en 2017. Ou encore la réception de nouvelles cimenteries d'opérateurs privés comme celle du groupe Lamouri à Biskra où celle de l'entreprise Hamel à Adrar dont la capacité de production est d'un million de tonnes chacune. D'après les statistiques et les nouvelles usines présentées dans la carte géographique (Figure I.4), nous avons remarqué une augmentation dans la production du ciment ce qui conduit une augmentation de l'émission de CO<sub>2</sub>.

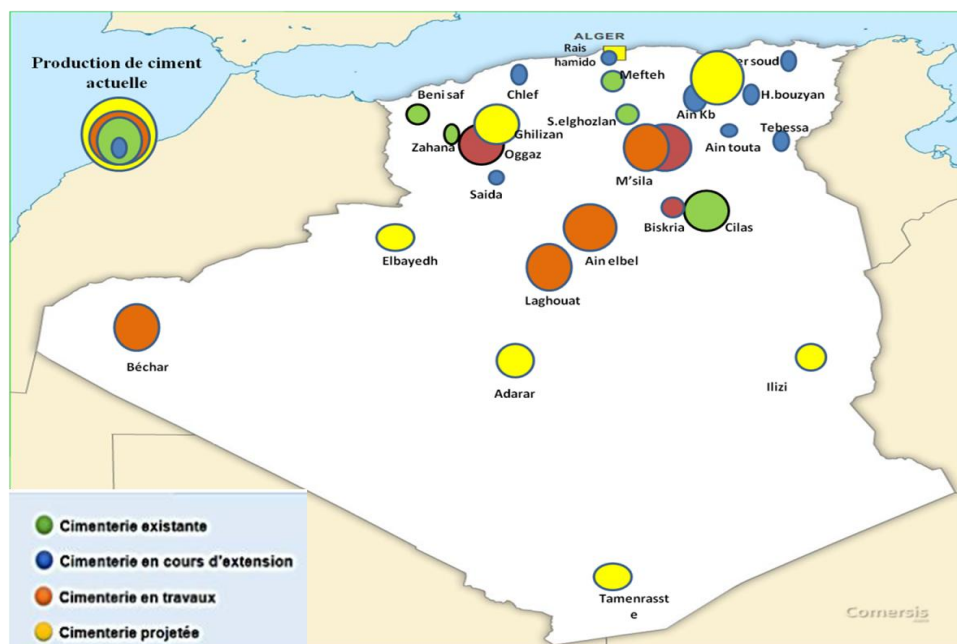


Figure I.4: La production du ciment en Algérie.

### I.3. LE METAKAOLIN COMME AJOUT CIMENTAIRE DANS LE BETON

Le ciment est la deuxième substance la plus utilisée dans le monde après l'eau. La réalisation de cet objectif selon les pratiques entraîne une augmentation inacceptable des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour atténuer les émissions, la solution principale proposée par l'autorité internationale de l'énergie en 2009 était le captage et le stockage du CO<sub>2</sub>. Dans le domaine de construction, une autre stratégie importante et bien établie pour réduire l'émission de CO<sub>2</sub> est le remplacement partiel du clinker par d'autres matériaux (cendre volante, le laitier, pouzzolane naturelle, fumée de silice, métakaolin...). Cette stratégie présente l'avantage de réduire l'émission de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie pour un environnement propre [23].

Le métakaolin (MK) est un type d'argile qui provient de la calcination, d'argile kaolinique [24]. Les mines de kaolin se trouvent dans différents pays, la Chine, l'Amérique du Sud, l'Amérique du Nord, l'Australie, Brésil, l'Égypte et plusieurs pays européens [25]. En Algérie il existe deux gisements importants de kaolin le premier se trouve dans la wilaya de Jijel (El-Milia) et l'autre dans la wilaya Guelma (Djebel Debbagh). Jusqu'à ce jour, l'utilisation de kaolin en Algérie reste comme charges dans les industries de la peinture, du caoutchouc, du plastique, de la chimie, du médical et de céramique. Dans cette partie on explore l'origine et comment obtenir un métakaolin. La partie se termine par la littérature sur l'utilisation et l'effet de MK sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité du béton.

#### I.3.1. Obtention de metakaolin

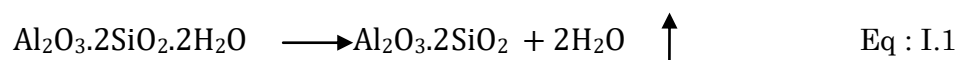
Le MK est l'un des matériaux de construction classés comme une nouvelle génération des minéraux, pouvant être utilisés comme ajouts cimentaires, qui offrent des avantages techniques et environnementaux [26]. Il peut être utilisé sous forme poudre finement broyée comme substitution partielle du ciment dans le mélange de béton pour améliorer ces performances par la réaction pouzzolanique. Le MK est principalement produit par

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

calcination (c.-à-d. traitement thermique) d'une argile kaolinite à une température variant entre environ 500 et 800 °C [27]

Le procédé de calcination est important pour la production de matériaux pouzzolaniques réactifs. L'eau est extraite de l'argile kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et la structure du matériau s'effondre, produisant un aluminosilicate amorphe ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) et produise un matériau appelé le MK. Le processus thermique est appelé déshydroxylation de kaolin et peut être exprimé par l'équation suivante [27] :



La conversion thermique de la kaolinite a fait l'objet d'un grand nombre d'études. Ils ont constaté que les principaux paramètres qui influencent significativement le processus de déshydroxylation sont la température de chauffage, la durée et la vitesse de chauffage, la vitesse de refroidissement et les conditions ambiantes. La perte de masse résultant de la déshydroxylation de la kaolinite pure (39,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 46,5 %  $\text{SiO}_2$  et 14 %  $\text{H}_2\text{O}$ ) à l'atmosphère ambiante est d'environ 14 % [27]. La durée du traitement thermique est couramment de cinq heures dans un four rotatif. Lorsque l'argile kaolinique est montée en température, son système cristallin se transforme et selon la température à laquelle est arrêtée la calcination [28].

### I.3.2. Effet de métakaolin sur l'ouvrabilité et le temps de prise

Pour connaître l'effet de MK sur l'ouvrabilité du béton/mortier des études antérieures ont montré l'effet de MK en faisant substituer une partie du poids de ciment avec différents taux de substitution et le comparer au mélange de références.

Valipour et al. [29] ont partiellement remplacé le ciment à 5% de MK en poids dans un mélange de béton. Le rapport Eau/Ciment (E/C) est fixé de 0,4 et divers dosages en superplastifiant (SP) ont été utilisés. Les résultats montrent que le mélange de MK présente une ouvrabilité inférieure à celle du témoin.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

Li et Ding [30] ont partiellement remplacé le ciment par 10% de MK en poids avec dosage de SP et au même rapport E/C de 0,28. Ils ont indiqué que la fluidité du ciment était devenue plus faible que celle du mélange de référence. Khatib [31] a montré aussi que le remplacement partiel du ciment dans les mélanges de béton par le MK aux niveaux de 0%, 5%, 7,5%, 12,5%, 15% et 20% en poids, abaisse l'ouvrabilité du béton avec l'inclusion de MK. La réduction de l'ouvrabilité a augmenté avec l'augmentation du contenu en MK.

Boddy et al. [32] ont réalisé une étude sur l'effet de rapport E/C et la variation de dosage en SP sur les propriétés à l'état frais de mortier fabriqué avec différentes concentrations de MK (0%, 8% et 12% en poids). Ils ont démontré que les mélanges présentent une ouvrabilité plus faible avec un rapport E/C de 0,3, tandis que 12% de MK atteint une ouvrabilité supérieure avec un rapport E/C égal 0,4 par rapport au mélange de contrôle et le mélange contenant 8% de MK. De plus ils ont indiqué que l'augmentation de pourcentage volumique de MK augmente le dosage de SP.

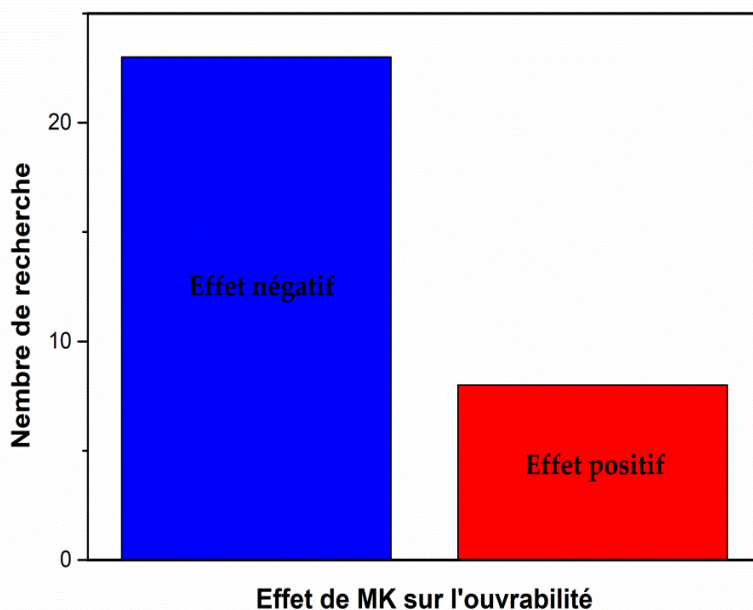
Siddique et Kaur [33] ont trouvé que la substitution partielle du ciment dans les mélanges de béton par le MK à des niveaux de 0%, 5%, 10% et 15% en poids, avec un E/C et dosage en SP fixe de 0,45 et 4,95 l/m<sup>3</sup>, respectivement. Les résultats observent une réduction de la maniabilité avec l'inclusion de MK. Le mélange contenant 15% de MK donne la maniabilité la plus faible.

Farshadfar et al [34] ont partiellement remplacé le ciment avec le MK aux concentrations de 0%, 5%, 10% et 15% en poids dans les mélanges des BAP. Un rapport E/C fixe de 0,38 et différents dosages de SP ont été utilisés. Ils ont trouvé une réduction de la fluidité et la capacité de passage des BAP avec l'inclusion de MK.

Karoline et al [35] ont étudié l'influence de MK sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP. Ces auteurs ont montré que l'augmentation de la finesse du MK engendre une augmentation de SP pour obtenir les propriétés souhaitées.

Brooks et al. [36] ont partiellement remplacé le ciment dans les mélanges de béton par le MK à des niveaux de 0%, 5%, 10% et 15% en poids. Des rapports fixes Eau/Poudre (E/P) de

0,28 et dosage en SP de 14 kg/m<sup>3</sup> ont été utilisés. Les résultats indiquent également que l'inclusion de MK retardait le temps de prise initial et final.

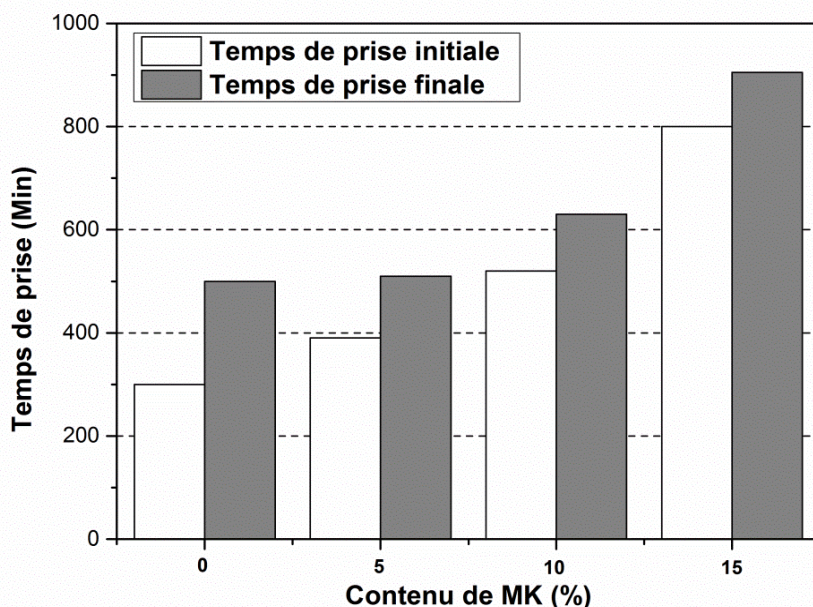


*Figure I.5: Effet de MK sur l'ouvrabilité des bétons/mortiers à partir de nombreuses études (source auteur).*

L'importance du temps de prise dans les pratiques de construction en béton est attribuée aux nécessités de planifier les différentes phases des opérations de construction, telles que le transport, la mise en place du béton, et la finition. Le temps de décoffrage dépend également du temps de prise du béton. L'incorporation de MK a une action importante sur la prise de la pâte et du mortier de ciment et également sur le béton.

Sonebi et al [37]. Moulin et ses collaborateurs [38] ont constaté que l'incorporation de MK peut conduire à une augmentation de comportement thixotrope et demande en eau plus élevée. Batis et al [39] ont déterminé l'effet du kaolin calciné à des niveaux de 0 %, 10 % et 20 % en poids. Les résultats ont montré des temps de prise initiale et finale plus longs grâce à l'introduction de kaolin calciné.

Badogiannis et al.[40] ont étudié le temps de prise initiale et finale de ciment ordinaire et mélangé avec différents types de MK, à des niveaux de remplacement de 0 %, 10 % et 20 %, avec un rapport E/C fixe de 0,4 . Les résultats montrent que le temps de prise augmente avec l'augmentation du MK. Au niveau du remplacement de 20 %, le temps de prise de pâte du ciment mélangé a été plus long que la pâte de 100% ciment. Khaleel et Abdul Razak [41, 42] ont effectué des essais sur le temps de prise pour des mortiers contenant de MK. Les pourcentages de substitution par rapport au poids de ciment étaient : 0%, 5%, 10% et 15%. Les résultats observent que le temps de prise initiale et finale augmente avec l'augmentation de la teneur en MK (Figure I.6).



*Figure I.6: Effet de la teneur en MK sur le temps de prise initiale et finale des mélanges de mortier [39].*

### I.3.3. Effet de métakaolin sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers

#### I.3.3.1. Résistance à la compression

Plusieurs chercheurs affirment que le MK et la fumée de silice contribuent au développement des performances du béton, mais le MK est relativement moins cher que la fumée de silice et peut-être utilisé plus fréquemment dans le béton pour améliorer ses

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

caractéristiques mécaniques, cette amélioration s'explique par nombreux auteurs par le fait que l'activité pouzzolanique est dominante, alors que d'autres auteurs favorisent la dominance l'effet physique. La substitution partielle du ciment par le MK a été étudiée expérimentalement sur les propriétés mécaniques du béton ou du mortier. En général, les chercheurs ne sont pas encore arrivés à une conclusion unique en ce qui concerne l'optimum de MK. Pour l'obtention des résistances maximales du béton/mortier/pâte. Il a été rapporté que le taux optimal dépend du type de ciment, le taux de substitution et le dosage des adjuvants. Certains auteurs croyaient que le rapport E/C est le principal facteur qui régit la teneur optimale de MK pour donner des résistances à la compression maximale. D'autres auteurs ont estimé que la température et la durée de calcination sont les principaux facteurs qui régissent la teneur optimale, tandis que d'autres pensent que la composition chimique pouvait avoir un facteur majeur affectant la teneur optimale de MK. En effet, il existe de nombreuses théories et nombreux résultats expérimentaux dans la littérature sur l'effet de la teneur optimale de MK [43, 44].

Bai et al. [45] ont évalué l'accélération du développement précoce de la résistance du béton à l'aide de MK comme ajout cimentaire. Le MK remplacé à des niveaux de 1%, 2%, 3%, 4%, et 5%. Quatre rapports E/C de 0,3, 0,4, 0,5 et 0,6 ont été utilisés. La résistance à la compression à 28 jours indique que 5 % de MK présente la résistance à la compression la plus élevée parmi tous les rapports E/C étudiée. Avec un rapport E/C de 0,3, l'amélioration de la résistance à la compression à 28 jours était de 0,12 %, 5,52 %, 7,53 % et 10,66 % avec l'inclusion de 1 %, 3 %, 4 % et 5 % de MK, respectivement.

Shelorkar et Jadhao [46] ont remplacé le ciment dans les bétons avec le MK à des niveaux de 4%, 6% et 8% en poids. Un rapport E/C fixe de 0,29 a été utilisé. Les résultats indiquent une amélioration de la résistance à la compression à 28 jours avec l'inclusion de MK. L'inclusion de 8% de MK présente la résistance à la compression la plus élevée pendant 28 jours, suivie de 6% et 4%, respectivement. L'amélioration de la résistance à la compression était de 8,69%, 13,21% et 21,74% avec l'inclusion de 4%, 6% et 8% MK, respectivement.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

Dinakar et al [47] ont étudié l'effet de la teneur en MK sur les propriétés du béton à haute résistance. Pour cela le MK remplacé le ciment avec des taux de substitution de 0%, 5%, 10% et 15% en poids, avec un rapport E/C fixe de 0,3 et un dosage en SP variable. Les résultats montrent que 10 % de MK ayant la résistance à la compression la plus élevée à 28 jours. L'amélioration de résistance était de 4,1 % et 7,55 % avec l'inclusion de 5 % et 10 % de MK, respectivement, tandis que la diminution de résistance enregistrée par l'inclusion de 15 % de MK.

Ramezani pour et Jovein [48] ont enregistré l'influence de MK sur la résistance et la durabilité des bétons. Le MK rajouté dans le béton comme ajout cimentaire à des taux de 0 %, 10 %, 12,5 % et 15 % en poids. Ils ont utilisé des rapports E/C différents de 0,4 et 0,5 avec un SP à base polycarboxylique pour obtenir la maniabilité souhaitée. Les résultats ont montré que 10 % de MK présentent la résistance à la compression la plus élevée à 28 jours avec tous les rapports E/C tandis que le rapport E/C=0,35 possèdent la résistance à la compression la plus élevée.

Khatib [49] a examiner le durcissement du béton à base de MK avec différents pourcentages de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30% en poids.. Les résultats de la résistance à la compression après 28 jours indiquent que la substitution avec 10 % de MK présentent la résistance la plus élevée, suivie de 20 % et 15 %, respectivement. Le développement de résistance était de 0,36 %, 12,52 %, 0,59 %, et 3,33 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de MK, respectivement, tandis que 30 % de MK subir une diminution de 27,36 %.

Seleem et al. [50] ont travaillent sur l'influence de MK sur les propriétés physico-mécaniques à une température élevée. Dans cela le MK remplacé par une substitution massique de 0%, 10% et 20%. Le rapport E/C et le dosage de SP fixe de 0,541 et 7 l/m<sup>3</sup> respectivement. Les résultats ont signalé que 10% de MK présente la résistance à la compression la plus élevée pendant 28 jours.

Behfarnia et Farshadfar [34] ont remplacé le ciment dans les mélanges de BAP par le MK à des concentrations de 0, 5, 10 et 15 % en poids. Les résultats ont indiqué que 15 % de

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

MK ayant la résistance à la compression la plus élevée. L'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours était de 5,02 %, 13,57 % et 25,84 % avec l'inclusion de 5 %, 10 % et 15 % de MK, respectivement.

Valipour et al. [29] ont examiné l'influence de MK sur les caractéristiques du béton. Pour cette étude le MK remplacé par le ciment de 0%, jusqu'à 15% en poids avec un pas de 5%. Un rapport E/C fixe de 0,4 et divers dosages de SP ont été utilisés. Les résultats ont observé que 15% de MK donnent la résistance à la compression la plus élevée.

Paiva et al. [51] ont étudié l'effet de MK sur les propriétés à l'état frais et durci du béton. Pour arrivés sur l'optimum de MK, ce dernier a remplacé le ciment à des niveaux de 0 %, 10 %, 20 % et 30 %, en poids, un rapport E/C fixe de 0,6 a été utilisé. Les dosages de SP étaient 0, 0,08, 0,15 et 0,2% pour 0%, 10%, 20%, et 30 % de MK, respectivement. Les résultats trouvent que 30 % de MK ayant la force de résistance la plus élevée. L'amélioration était de 4,46 %, 17 % et 18,37 % avec l'inclusion de 10 %, 20 % et 30 % de MK, respectivement.

Rabehi et al. [52] ont produit un MK par traitement thermique du kaolin. Ils ont remplacé le ciment dans les mortiers par du kaolin calciné à des niveaux de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, en poids. Un rapport E/C fixe de 0,5 a été utilisé. Les résultats analysent que 5 % MK donne également la résistance à la compression la plus élevée.

Potgieter-Vermaak et Potgieter [53] ont étudié la résistance à la compression optimale à 28 jours, pour des mortiers contenant 0 %, 10 %, 20 % et 30 % de MK .Ce dernier a été obtenu par calcination du kaolin à 550 °C pendant 30 et 60 minutes, 650 °C pendant 30 et 60 minutes, 750 et 850 °C pendant 60 minutes.

Ils ont indiqué que le taux de remplacement optimal était de 30 % lorsque la température de calcination était de 550 °C pendant 30 minutes, de 10 % lorsque la température de calcination était de 550 °C pendant 60 minutes, de 10 % lorsque la température de calcination était de 650 °C pendant 30 minutes, de 30 % pour la température 650 °C pendant 60 min, 10 % lorsque la température de calcination était de

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

750 °C pendant 60 min et 10 % lorsque la température de calcination était de 850 °C pendant 60 min.

Taylor-Lange et al. [54] ont préparé un mortier avec 15 % de MK. La durée de calcination de kaolinite est de 500, 550, 600 et 650 °C pendant 1 h. Ils ont remarqué une augmentation de résistance à la compression à 28 jours avec la calcination de kaolinite à 650 °C.

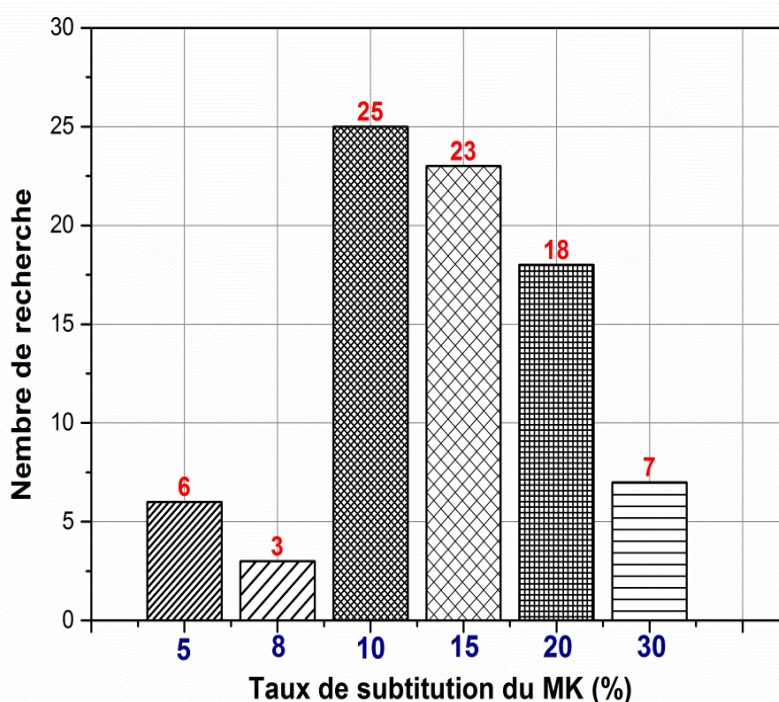
De Gutiérrez et al. [55] ont activé le kaolin avec différentes températures de 500, 600, 700, 800 et 900 °C pendant 1h. Un rapport E/C fixe de 0,4 a été utilisé. Ils ont calculé l'activité pouzzolanique de chaque type de kaolin traité thermiquement et en mesurant le rapport de la résistance à la compression du mortier à 20 % de MK ajouté à celle du mortier de référence. Les résultats de la résistance à la compression indiquent que les échantillons de kaolin calciné à température de 700 °C présentent la résistance la plus élevée.

He et al. [56] ont activé le kaolin pendant 100 min à différentes températures de 550, 650, 800 et 950 °C. Les mortiers de ciment ont été partiellement remplacés par 20 % de kaolin calciné, en poids. Ils ont remarqué que l'optimisation de la température de calcination était de 800 °C suivie par 950, 550 et 650 °C, respectivement. L'amélioration de résistance à la compression à 28 jours était de 20 %, 17 %, 31 % et 25 % avec l'inclusion de calcination des kaolins traités à 550, 650, 800, et 950 °C, respectivement.

Said-Mansour et al. [57] ont étudié l'influence du kaolin algérien sur les propriétés de mortier. Ils ont calciné à des températures de 650, 750, 850 et 950°C pendant 2, 3 et 4 heures. Le taux de substitution de ciment par le kaolin traité est de 10 %, 20 %, et 30 % respectivement. Un rapport E/C fixe de 0,5 et 0,9 % de SP pour le mélange de 30 %. Ils ont conclu que le traitement thermique de kaolin à 850 °C pendant 3 h a été efficace pour la conversion du kaolin en MK. Dans ces conditions, le produit par le MK présente la réactivité pouzzolanique la plus élevée. L'inclusion de 20 % de kaolin traité a permis d'obtenir la plus haute résistance à la compression à l'âge de 28 ans jours.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

En général, quel que soit l'effet du rapport E/C, la durée de calcination et la nature de kaolin la plupart des auteurs estiment que 10 % et 15 % de MK sont le remplacement optimal de ciment pour obtenir des résistances à la compression à 28 jours la plus élevée, suivie de 20 %, 5 % et 8 %, respectivement (Figure I.7).



*Figure I.7: Optimum de MK sur la résistance à la compression des bétons/mortiers à partir des nombreuses études (source auteur).*

### I.3.3.2. Résistance à la traction

Hong et al. [58] ont réalisé une étude sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à haute résistance à base de MK. Les auteurs ont remarqué qu'il n'y a pas un effet significatif sur la résistance à la flexion avec 5%, 10% et 15%MK, tandis que l'inclusion de 20% MK a montré une légère réduction de la résistance à la traction par flexion. John [59] a remplacé le ciment dans les bétons par le MK à des niveaux de 0%, 5%, 10%, 15% et 20% en poids. Un rapport E/C fixe de 0,45 a été utilisé.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

Les résultats montrent que la résistance à la traction augmente avec l'inclusion de MK. L'amélioration de la résistance à la traction à 28 jours était de 0,72 %, 3,94 %, 8,96 % et 5,73 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de MK, respectivement.

Yerramala et al. [60] ont examiné la résistance de traction par flexion du mortier contenant 5 % à 25 % du MK en poids. La résistance à la flexion a été mesurée à différents âges de 7, 28, 90 et 180 jours. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la flexion avec 5 %, 10 % et 15 % de MK, tandis que 20 % et 25 % de MK ont enregistré une résistance inférieure à celle du témoin. L'inclusion de 10 % du MK présente la teneur optimale de résistance.

Courard et al. [61] ont étudié l'effet du contenu en MK sur la résistance à la flexion des mortiers. Le ciment était remplacé par le MK à des niveaux de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, et 20 %, en poids. Les résultats indiquent que l'inclusion de MK diminué la résistance à la flexion à l'âge de 3 jours et a presque atteint la même force à 7 jours.

À l'âge de 14 et 28 jours, les mortiers contenant du MK ont atteint une résistance supérieure. L'amélioration à 28 jours, de résistance à la flexion était 4,28 %, 3,85 %, 3,62 % et 0,22 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, respectivement.

J Rani et al. [62] ont remplacé le ciment dans les bétons par le MK à des taux de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 % en poids. Les résultats ont montré une résistance à la flexion plus élevée avec l'inclusion de MK. L'inclusion 10 % de MK a présenté la résistance à la flexion la plus élevée, l'amélioration à 28 jours a été 5,96 %, 13,16 %, 8,95 % et 2,98 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de MK, respectivement.

### *I.3.3.3. Module d'élasticité*

Il existe peu de documentation concernant l'effet du MK sur le module d'élasticité (ME) du béton. Comme il a été démontré que l'introduction de MK augmente la résistance à la compression et densifie la microstructure, il en résulte une augmentation du module d'élasticité, ou le béton plus rigide. D'après la documentation, le ME semble généralement

augmentent avec l'augmentation de la teneur en MK, bien que le taux d'augmentation soit inférieur à celui de la résistance à la compression.

Qian et Li [63] ont rapporté à l'âge de 3 jours de durcissement, le béton contenant 15 % de MK donne un ME de 26,2GPa, comparativement à 24,1 GPa pour l'échantillon témoin à cet âge. À l'âge de 60 jours, les valeurs mesurées du ME de 15% MK et le témoin été respectivement de 34,7 et 30,4GPa. Khatib et Hibbert [64] ont évalué le ME dynamique des bétons contenant 0 %, 10 % et 20 % de MK, en poids. Les résultats ont montré un ME plus élevé avec l'inclusion de MK, une augmentation considérable entre 28 et 90 jours, le ME a augmenté de 38 MPa à 50 MPa respectivement.

Khatib [31] a remplacé le ciment dans les bétons par le MK à des niveaux de 0%, 5%, 7,5%, 12,5%, 15%, et 20% en poids. Un rapport E/C fixe de 0,3 et un dosage fixe en SP de 1,36 %, ont été utilisés. Les résultats ont indiqué que le MK entre 12,5 % et 15 % présente le module d'élasticité dynamique maximal.

### **I.3.4. Effet de métakaolin sur la durabilité des bétons/mortiers**

#### *I.3.4.1. Absorption d'eau*

K. Al-Jabri et al [39] ont formulé des mortiers avec différents pourcentages de MK 2, 4, 6, 8, 10, 12 et 14%. Les résultats ont enregistré une diminution d'environ 24% d'absorption d'eau par rapport au mortier de référence.

Courard et al. [61] ont étudié également le comportement des bétons avec le MK lors d'immersion dans l'eau. Les résultats indiquent que l'absorption d'eau tend à diminuer légèrement avec l'augmentation de la teneur en MK. D'après l'auteur ces résultats découlent de la densification de la matrice cimentaire par les produits des réactions pozzolanique. Les hydrates réduisant ainsi les capacités d'absorption d'eau du béton. Signalons que khatib et al. [65] ont fait des tests sur l'absorption d'eau des bétons incorporant différents taux de MK. Leurs résultats montrent que le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en MK (Figure I.8).

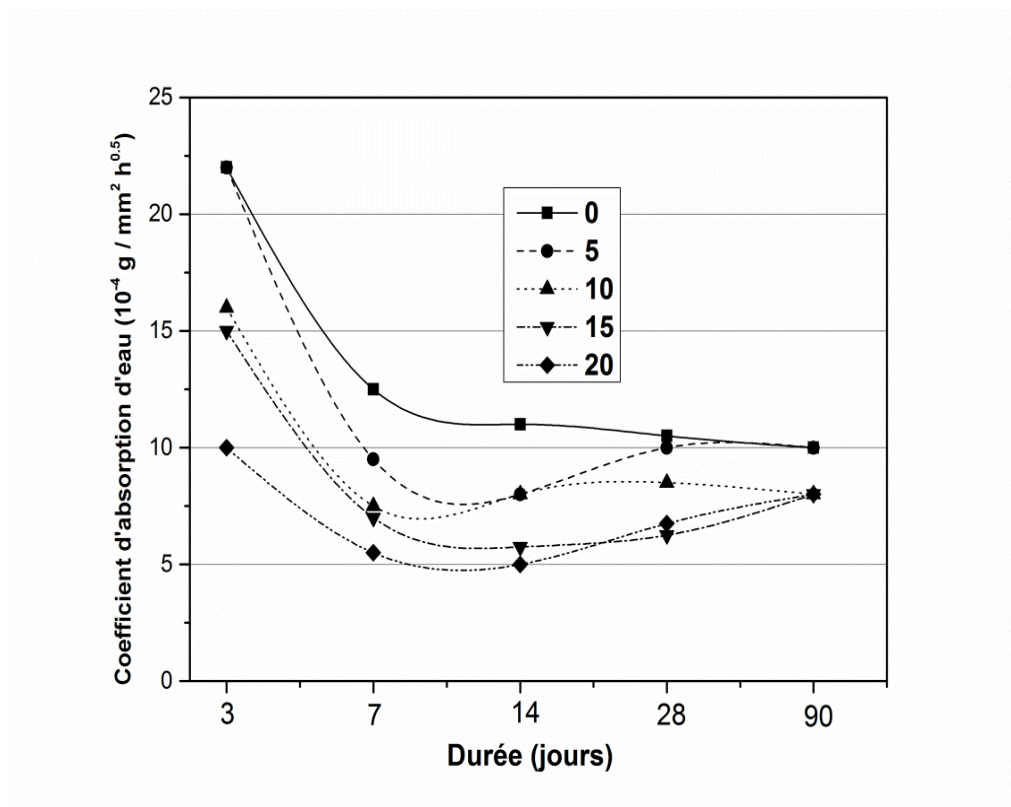


Figure I.8: Coefficient d'absorption d'eau en fonction de MK [65]

Anhad singh et al. [66] ont aussi, montré que l'absorption d'eau diminue avec la présence de métakaolin. D'après l'auteur plus il ya de metakaolin plus la porosité capillaire affectée et plus le coefficient d'absorption d'eau diminue.

#### I.3.4.2. Retrait de séchage

L'effet de MK sur les propriétés de retrait est controversé. En général, on s'attend à ce que le retrait augmente lorsque le MK est utilisé comme ajout cimentaire, mais son incorporation offre des nombreux avantages tels que l'augmentation de la résistance et la diminution de la perméabilité. Ceci est très probablement dû à l'effet de remplissage ou au raffinement de la structure des micro-pores, qui entraîne normalement un retrait plus important. Le retrait de séchage est la réduction du volume de la pâte, du mortier ou du béton due à la perte d'eau.

Brooks et Johari [67] ont constaté que le retrait du béton à jeune âge est diminué en raison de l'introduction des MK. Le béton de MK présente moins de retrait total que les mélanges de contrôle, lorsque la teneur en MK est plus élevée. Khatib et Adams [26] ont évalué la stabilité dimensionnelle du mortier contenant des quantités de MK soumis à différentes conditions environnementales. Les résultats ont montré que le retrait diminué avec l'inclusion de MK. Les retraits endogène et chimique des pâtes de ciment avec le MK ont été étudiés par Wild et ses collaborateurs [68]. Ils ont été constatés que les deux types de retrait augmentent par rapport aux pâtes de ciment témoin.

#### *I.3.4.3. Résistance à la pénétration aux ions chlorures*

Gruber et al. [32] ont déterminé la diffusion du chlorure jusqu'à 365 jours. Les coefficients de diffusion apparents diminuent avec l'augmentation du temps et la diminution du rapport E/C, et montrent aussi des diminutions marquées avec l'augmentation de la teneur de métakaolin à haute réactivité (MHR).

Bai et al. [69] ont rapporté que des réductions significatives des profondeurs de pénétration du chlorure ont été observées lorsque le ciment a été partiellement remplacé par le MK dans le béton. Ces réductions ont augmenté à la fois avec l'augmentation du niveau de remplacement total et l'augmentation du temps d'exposition. Cela a été attribué aux changements relatifs de la diffusivité intrinsèque et de la capacité de liaison au chlorure avec l'âge de béton.

Asbridge et al. [70] ont étudié la pénétration du chlorure dans des mortiers ayant des teneurs en MK et fractions volumiques différentes à base de granulats afin d'évaluer l'effet de MK sur la zone de transition interfaciel (ZTI). Ils ont constaté que la diffusion était moindre avec des mortiers contenant du MK.

Anita Nivrutti Borade et al. [71] ont étudié le comportement à la corrosion du béton armé mélangé au métakaolin dans un environnement de chlorure. Ils ont conclu que le

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

béton préparé avec du MK a une meilleure résistance à la corrosion par rapport au béton témoin (Figure I.9).

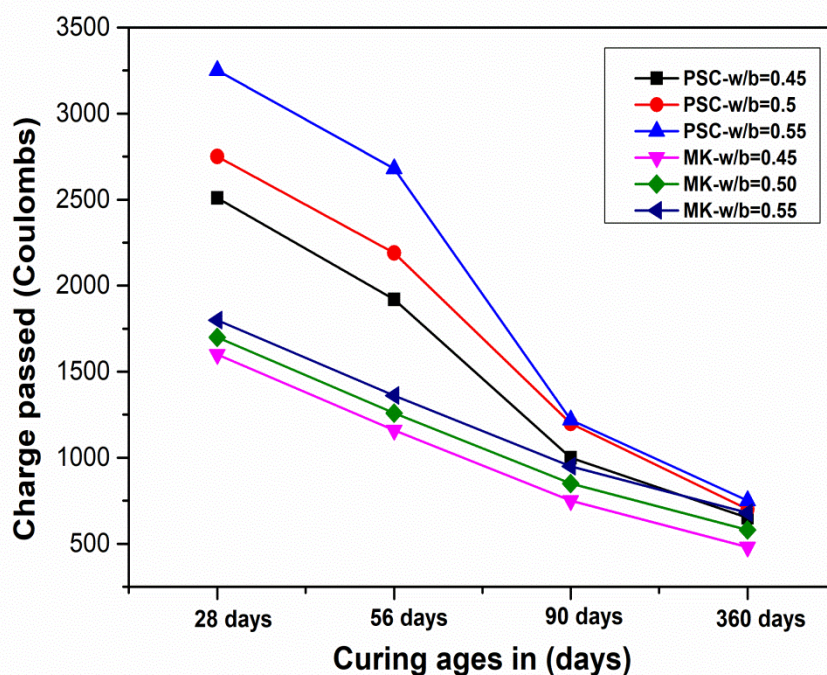


Figure I.9: Test de pénétration de chlorure avec et sans ajouts de MK [71].

### I.3.4.4. Réaction alcalis silice

Le MK a été utilisé pour réduire les effets des réactions alcalis silice (RAS). Le rôle de MK est d'améliorer le raffinement des pores et la densification de la microstructure du béton qui conduit à une faible perméabilité. De plus, l'incorporation des ajouts cimentaires tels que les matériaux pouzzolaniques réduit la teneur en ciment et diminue la teneur en alcali et la valeur du pH. La protection du béton se fait généralement par le remplacement du ciment avec des cendres volantes, des fumées de silice ou des scories de classe F ou C [26]. Des études ont montré que le remplacement de 10 à 15 % du ciment par du MK est très efficace pour atténuer le phénomène de la RAS [72].

Ramlochan et al. [73] ont rapporté que l'incorporation de métakaolin à haute réactivité (MHR) comme remplacement partiel du ciment entre 10 et 15% peut être suffisante pour contrôler l'expansion due à la RAS dans le béton, selon la nature de granulats, la quantité de MHR nécessaire pour contrôler l'expansion se situe entre 10 et 15%. Le mécanisme par lequel MHR peut supprimer l'expansion et peut être due à la RAS qui semble le piégeage des alcalis par les hydrates supplémentaires et une diminution conséquente du pH des solutions interstitielles.

#### *I.3.4.5. Attaque des sulfates*

En raison de ses propriétés pouzzolaniques, l'incorporation de MK dans le béton devrait affecter sa résistance aux sulfates [74]. L'attaque au sulfate est la principale forme d'attaque chimique à laquelle le béton peut être soumis. Les ions sulfates sont souvent présents dans les eaux souterraines et les sols argileux, ou près de l'industrie lourde où des déchets industriels sont générés. L'industrie peut comprendre les mines, la sidérurgie et fabrication de produits chimiques [75]. L'attaque du sulfate par le béton peut provoquer des fissures et des gonflements à cause de la formation de gypse et d'ettringite [76].

Selon Wild et khatib. [77] le béton contenant plus de 10% de MK avait une résistance aux sulfates supérieure à celle du témoin. Cependant, la composition chimique de MK est différente à d'autres ajouts cimentaires en ce qu'il a une teneur en alumine plus élevée. Les produits de réaction que forment le MK et CH ne sont pas seulement C-S-H, mais comprennent également  $C_4AH_{13}$ ,  $C_3AH_6$  et  $C_2ASH_8$ .

Wild et al. [78] ont examiné la résistance aux sulfates du mortier de MK où deux types de ciment étaient utilisés: l'un à teneur intermédiaire en  $C_3A$  et l'autre à forte teneur en  $C_3A$ . L'expansion due à l'exposition aux solutions de sulfate s'est avérée diminuée dans un ordre systématique avec une teneur en MK de 10% ou plus pour les deux ciments. Al-Akhras et al [79] ont orientés leur recherche sur l'utilisation des MK dans le béton ordinaire. Les résultats constatent que malgré le BO n'était pas durable à l'attaque des sulfates, mais la résistance de ce dernier augmente avec l'augmentation de MK.

#### I.4. BETON À BASE DES GRANULATS DE VERRE RECYCLE

Le verre en tant que matériau à part entière sera largement utilisé à l'avenir. Il a un large éventail d'application et est produit dans des nombreuses formes et types; il s'agit notamment de verre d'emballage ou de récipient, bouteille et verre à tube cathodique (écrans de télévision, moniteurs) [80]. Bien que le verre soit un matériau inerte, tous les produits en verre ont une durée de vie limitée. Par conséquent, beaucoup des déchets sont générés et une énorme quantité de verre est produite chaque année, ce qui conduit des nombreux chercheurs à chercher des moyens pour minimiser la quantité de verre dans les décharges [81].

Ce matériau a l'avantage d'être recyclé à l'infini, chaque année des tonnes de produits verrerie se trouve dans nos poubelles, ces produits issus de notre consommation quotidienne. Ces déchets constituent une menace majeure sur notre environnement, car ces produits mettront beaucoup de temps pour se dégrader si l'on ne traite pas convenablement. Actuellement beaucoup d'associations tirent la sonnette d'alarme pour avertir les gouvernements et les citoyens de danger que ces déchets peuvent causer à la nature. Alors les dirigeants des gouvernements n'ont pas hésité à prendre des mesures et mettre des lois pour diminuer le volume de ces déchets qui nuisent à notre environnement. L'utilisation des déchets de verre recyclés dans le ciment Portland et le béton a également beaucoup d'intérêt dans le monde entier en raison de l'augmentation des coûts d'élimination et des préoccupations environnementales [80]. Le verre de tube à rayon cathodique (TRC) est un déchet issu des moniteurs et des téléviseurs éliminés et classé dans le catalogue européen des déchets et la législation nationale correspondante comme un déchet dangereux, car il contient une quantité significative de plomb (teneur moyenne en PbO de 22-25%), un processus de traitement spécifiquement conçu était nécessaire avant de pouvoir être réutilisé. Les quantités totales de verre (TRC) rejetées chaque année varient selon les régions. En Europe, on estime que plus de 150 000 tonnes de verre TRC sont traitées chaque année et que plus de 600 000 tonnes pourraient être atteintes en 2013 [82]. En effet, devant l'importance du gisement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), il devient indispensable de se

préoccuper de leur valorisation. Dans le contexte du développement d'un éco-béton avec des déchets de verre recyclés, nombreuses études ont porté sur l'utilisation des déchets de verre dans le béton comme remplacements de ciment (poudre) ou bien comme remplacement de sable naturel (cette partie résume l'influence de verre recyclé comme granulats fins sur les propriétés rhéologiques, physico- mécaniques et la durabilité du béton/mortier).

#### I.4.1. Source de verre

Sur la base des compositions chimiques les plus courantes, le verre peut être classé dans les catégories suivantes: silice vitreuse, silicates alcalins, verre sodocalcique, verre borosilicaté, verre au plomb, verre au baryum et verre alumino-silicate (Figure I.10). D'autre part des petites quantités d'additifs sont souvent ajoutées lors de la fabrication du verre pour donner différentes couleurs au verre ou pour améliorer les propriétés spécifiques. Le verre sodocalcique est le plus largement utilisé pour fabriquer des récipients, des flotteurs et des feuilles, le verre de plomb est principalement pour les écrans de télévision et l'équipement d'écran d'affichage , le verre borosilicaté est destiné à la fabrication de fibres de verre [81].



Figure I.10 : Diférent type des déchets de verre.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

### I.4.2. Recyclage des déchets de verre dans le monde

Le taux de recyclage des déchets de verre est très bas dans le monde entier et il est principalement concentré sur le secteur des conteneurs et de l'emballage. Le tableau I.1 indique 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 [83].*

Pays	Déchet de verre (tonne)	Taux de recyclage (%)	Année	Référence
USA	11, 500,000	27	2010	[84]
Canada	116,000	68	2009	[85]
Singapour	72,800	29	2010	[86]
Suède	195,000	93	2010	[87]
Portugal	493,000	25	2001	[88]
Turquie	120,000	66	2004	[80]
Allemagne	3, 200,000	94	2003	[80]

### I.4.3. Recyclage des déchets de verre en l'Algérie

Selon l'agence nationale des déchets (AND), une étude faite sur la stratégie nationale et plan d'action de la gestion intégrée et de la valorisation des déchets (SNGID) en Algérie à l'horizon 2035. Le pourcentage total des déchets de verres, produits par jour et par habitant va passer de 1.1%. À ce jour la mise en œuvre de la SNGID n'aura pas seulement pour effet de réduire la production des déchets du verre, mais également celles des autres flux. D'après les statistiques d'études, le taux de valorisation des déchets solides évoluera vers 47% en 2035, et celui des déchets inertes vers 60%.

#### I.4.4. Influence de granulats de verre sur l'ouvrabilité

Le contenu et les propriétés des particules de verre recyclé peuvent avoir une incidence importante sur l'ouvrabilité du béton. Une surface lisse, une texture dure, une faible absorption d'eau et une cohésion plus faible entre les granulats de verre (GV) et les pâtes de ciment peuvent améliorer la maniabilité. Cela entraîne une augmentation relative du rapport E/C, c'est-à-dire que la teneur en eau efficace dans le mélange de béton augmente qui peut également augmenter l'ouvrabilité du béton frais. Le résultat dépend de l'interaction de la taille, de la forme et de la texture des particules de verre recyclées et de leur contenu [81].

Comme la montre dans la figure I.11, la tendance générale observée que le remplacement partiel du sable naturel dans les mélanges de mortiers avec du verre TRC indique une augmentation de la maniabilité avec l'augmentation de pourcentage du granulats de verre TRC [89].

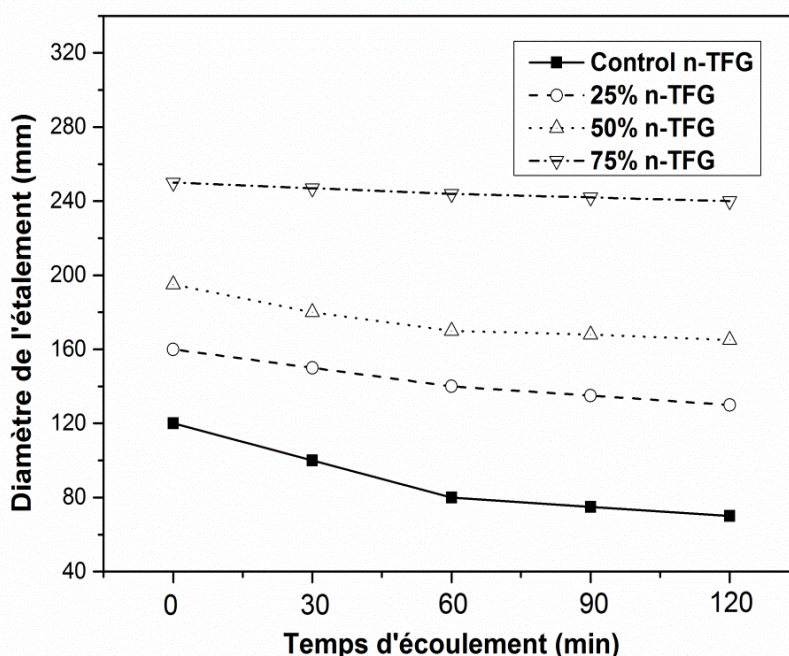


Figure I.11 : diamètre de l'étalement de mortier avec différent % de verre TRC en fonction de l'évolution de temps [89].

**CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS  
L'INDUSTRIE DU BETON**

---

Zhao et al. [90] ont rapporté le remplacement partiel du sable naturel dans des mélanges de béton à haute densité avec des granulats de verre TRC traité par l'acide nitrique à des niveaux de 0%, 25%, 50% et 75%, par volume de béton. Les résultats montrent une augmentation d'affaissement avec l'augmentation du contenu de GV. L'augmentation est de 112,5%, 200% et 237,5% avec l'inclusion de granulat du verre TRC de 25%, 50% et 75%, respectivement.

Pour le béton autoplçant Sua-iam et Makul [91] ont étudié l'influence de verre TRC dans les mélanges de béton autoplçant à des niveaux de 0%, 20% et 40% en poids. Les résultats montrent une réduction de diamètre d'étalement et une augmentation de temps d'écoulement avec l'augmentation de la teneur de granulats du verre (Tableaux I. 2).

*Tableaux I.2 : L'ouvrabilité des mélanges de BAP [91].*

Type de BAP	Diamètre de l'étalement (cm)	Temps V-funnel (s)	Cône de marche (s)
TRC0FC0	35	3	60
TRC20FC0	34	5	100
TRC20FC5	35	4	113
TRC20FC10	37	3	122
TRC20FC15	34	4	138
TRC40FC0	33	6	122
TRC40FC5	34	5	141
TRC40FC10	41	4	186
TRC40FC15	39	5	238

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

Ali et Al-Tersawy [92] ont testé l'étalement du béton autoplaçant avec l'introduction de GV, ils ont observé que le béton avec le verre recyclé obtenait des valeurs d'étalement similaires à celles du témoin, malgré le dosage en SP est plus faible. De plus, le béton composé de 50% de verre comme granulats fins donne un étalement de (740 mm), ce dernier est élevé de l'ordre de 12 % par rapport le témoin.

Hui and Sun [93] ont orienté leur recherche vers l'utilisation des déchets du verre TRC comme granulats fins dans le mortier, le sable a été remplacé par les déchets du verre TRC sans fusion de plomb (SPbO) et avec fusion de plomb (PbO) a des niveaux de 0% et 100%. Les résultats indiquent des valeurs plus élevées du diamètre de l'étalement initial et un meilleur étalement obtenait avec l'inclusion de verre TRC. L'augmentation du diamètre initial de l'étalement et de 173% et 165% avec l'inclusion de SPbO et PbO, respectivement. La figure I.12 représente les résultats de l'ouvrabilité de béton à partir de nombreuses études.

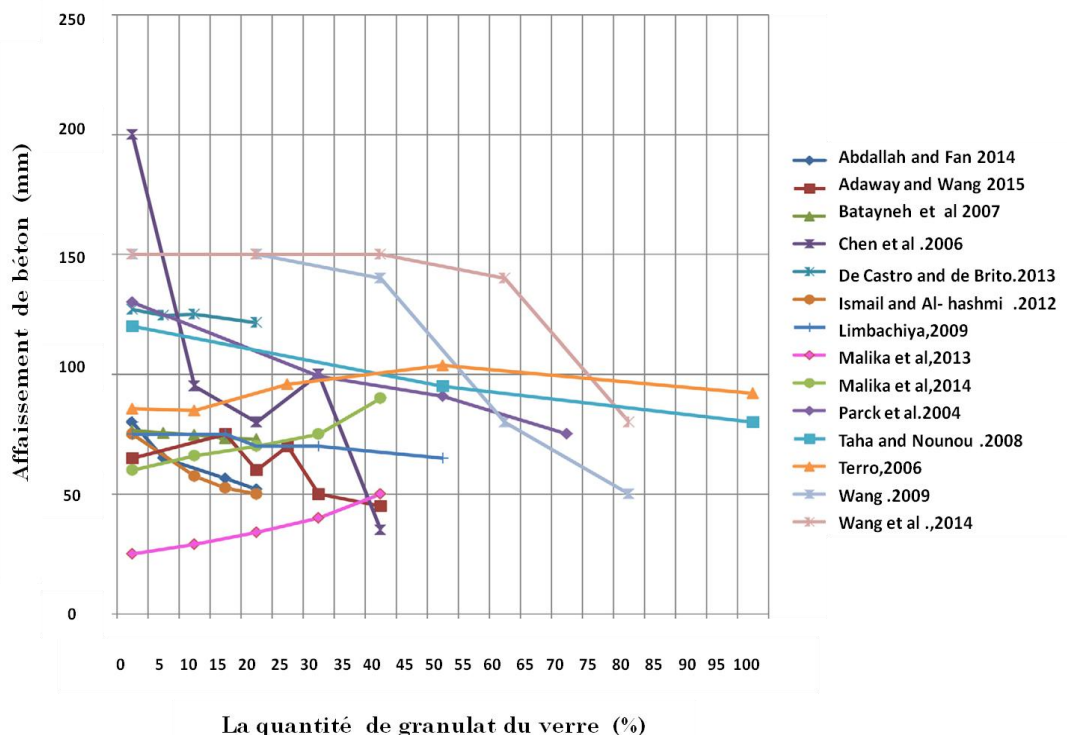


Figure I.12 : l'ouvrabilité de béton à partir de nombreuses études [93].

#### **I.4.5. Influence de granulats de verre sur les résistances mécaniques**

Les propriétés des particules de verre produisent des effets négatifs sur les résistances mécaniques sur plusieurs aspects. Premièrement, il est difficile d'obtenir une distribution homogène des granulats avec la présence de verres recyclés en raison de la mauvaise géométrie du verre recyclé. Deuxièmement, la grande fragilité du verre recyclé et les fissures inhérentes aux particules de verre recyclées qui existaient en raison du processus de concassage peuvent être considérées comme une source de faiblesse. Troisièmement, la surface lisse conduit à un affaiblissement relatif entre les granulats de verre et la pâte de ciment.

De plus, la contamination et la teneur en matière organique du verre recyclé peuvent avoir des effets négatifs sur le développement des résistances et des résultats finaux [94], si le verre recyclé n'est pas traité correctement. Les facteurs qui affectent la résistance à la compression s'appliquent également à la résistance à la flexion; le verre recyclé a des effets similaires sur la résistance à la flexion de béton du verre recyclé.

##### *I.4.5.1. Résistance à la compression*

Ling et al. [95] ont remplacé le sable naturel avec le verre TRC (taille 0.15-2.36 mm) à des niveaux de 0%, 25%, 50%, 75% et 100%, en volume. Le verre TRC a été utilisé sans traitement (ST) et avec traitement (T). La résistance à la compression à l'âge de 28 jours diminue avec l'augmentation de la teneur en verre en raison de l'adhérence plus faible entre la surface lisse des particules de verre et du ciment.

Comme illustré dans la figure I.13 ont rapporté une réduction de la résistance à la compression des mortiers contenant du verre 100% en tant que granulats fins. Le taux de réduction de la résistance à la compression est inférieur à celui de la résistance à la flexion. Il est clair que les mortiers avec 100 % de verre TRC présentent une réduction de la résistance à la compression par rapport le témoin. À l'âge de 90 jours, la moyenne de la réduction de la résistance à la compression est d'environ de 18%, d'autre part, la taille de

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

verre plus fine offre une résistance mécanique supérieure à celle des particules de verre grossier [96]. Ling et Poon [97] ont signalé une réduction de la résistance à la compression à 28 jours avec 13,3% et 16,63% pour l'inclusion de 100% de verre TRC traité et non traité, respectivement. Taha et Nounu [94] ont constaté que le témoin obtenait des résistances à la compression plus élevées par rapport aux mélanges qui contiennent (50% et 100%) de verre concassé.

Malik et al. [98], et Adaway et Wang [99] ont observé que le béton avec 30% de verre concassé présente des valeurs de résistance à la compression supérieure à celles du témoin à 7 et 28 jours, de plus au-delà de 30% de substitution la résistance de compression est inférieure par rapport au contrôle.

D'autres rapporteurs Turgut et Yahlizade [100], Chen et al. [101], Pereira de Oliveira et al. [102], et Batayneh et al. [103] ont dit que la résistance à la compression est toujours plus élevée que le contrôle.

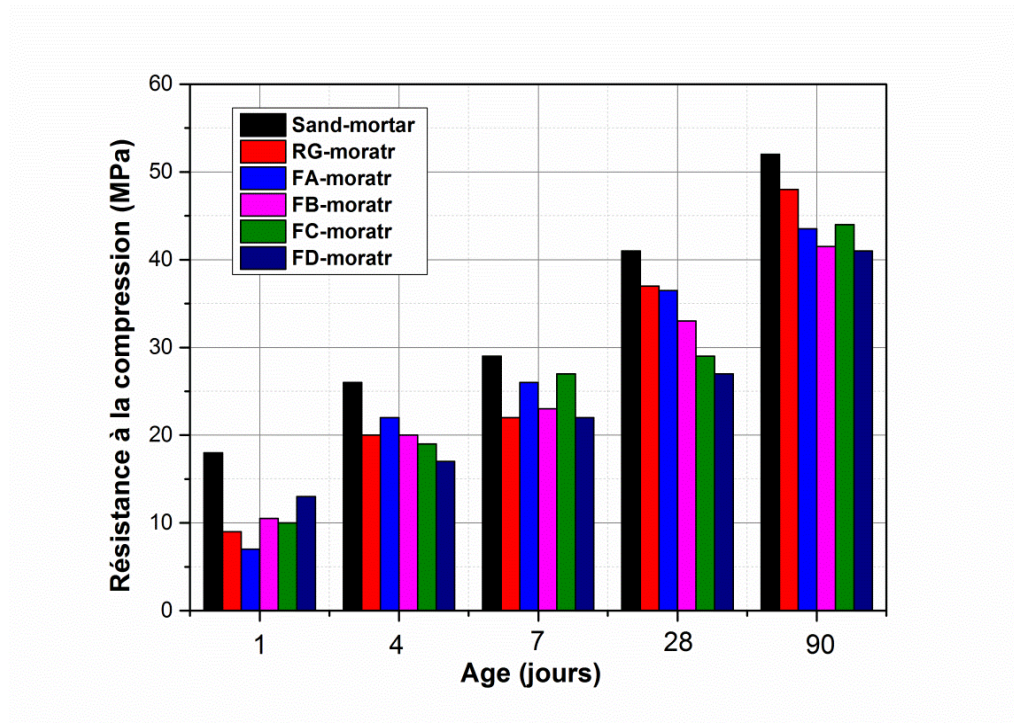


Figure I.13 : Effet de taille des granulats de verre sur la Résistance à la compression [96].

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

Romero et al. [82] ont enregistré d'après leur recherche que la résistance à la compression des bétons contenant du verre TRC comme granulat secondaire à des niveaux de 10%, 20% et 30%, en volume, répond ou dépasse celle du témoin. Tamanna et al. [104] ont étudié les performances de béton à base des granulats de verre recyclé comme remplacement partiel du sable naturel. Trois pourcentages de substitution de GV ont été utilisés (20%,40% et 60%). Les résultats montrent une légère augmentation de résistance à la compression avec l'augmentation de taux de substitution.

Bostanci [105] a utilisé les granulats de verre pour la production de béton écologique, le GV a été remplacer le sable avec un taux de substitution de 20%. Les résultats montrent une réduction de résistance à la compression par l'inclusion de GV. Zeng et al. [106] ont constaté d'après leur recherche que l'utilisation de granulas de verre dans les mélanges de béton n'affecter pas la résistance à la compression les résultats sont similaires au béton témoin. La figure I.14 représente les résultats de résistance à la compression à partir de nombreuses études.

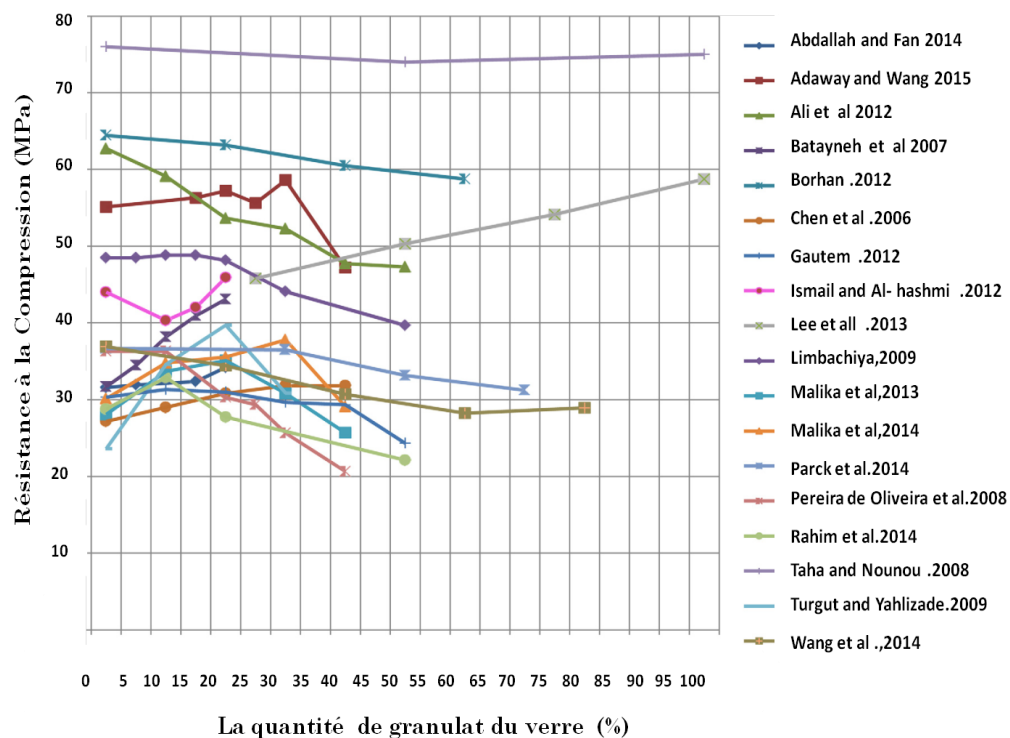


Figure I.14 : les résultats de résistance à la compression à partir de nombreuses études [93].

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

### I.4.5.2. Résistance en traction par flexion

Comme dans le cas de la résistance à la compression, la majorité des études ont indiqué que l'inclusion des granulats de verre a des effets similaires sur la résistance à la traction du béton. Plusieurs chercheurs ont testé des résistances à la flexion Taha et Nounu [94], Ali et Al-Tersawy [92], Ismail et Al-Hashmi [107], et Park et al. [108]. Ils ont observé que l'augmentation des pourcentages des granulats du verre mené une diminution de la résistance à la flexion. En revanche, Batayneh et al. [103], et Abdallah et Fan [109] ont rapporté que des proportions croissantes de verre usagé entraînent une augmentation de la résistance à la flexion.

Limbachiya [110] a rapporté que le béton contenant de granulat du verre fin avec des proportions allant jusqu'à 20% n'observe aucun changement de la résistance à la flexion. Cependant, le remplacement des granulats du verre fin supérieurs à 20% présente des résistances à la flexion faible. La figure I.15 représente les résultats de résistance à la traction par flexion à partir de nombreuses études.

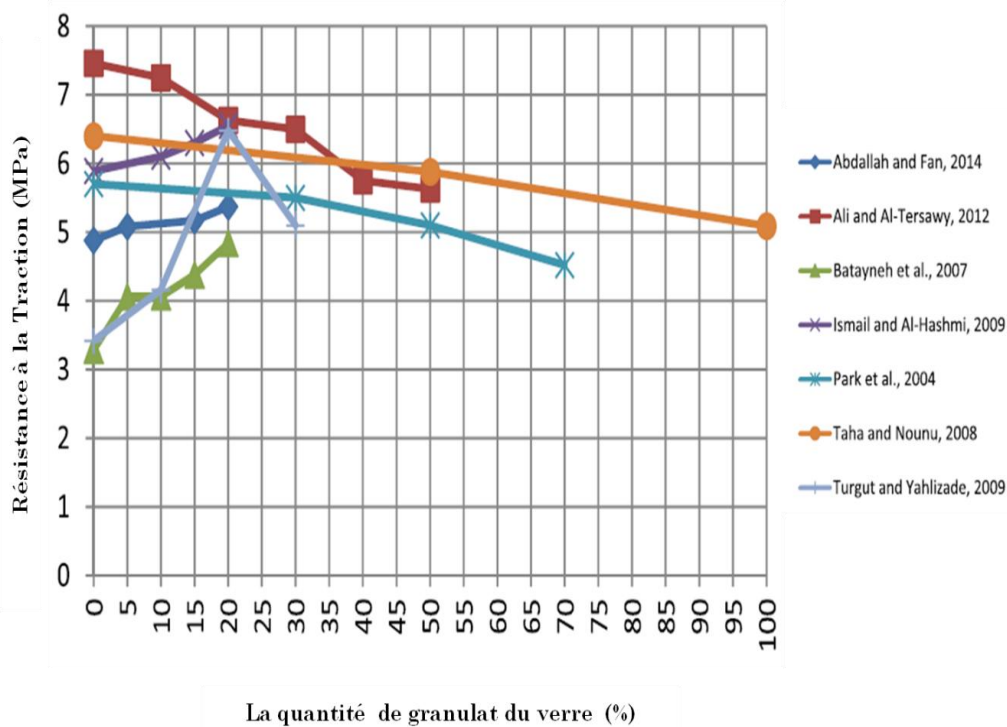


Figure I.15 : les résultats de résistance à la traction à partir de nombreuses études [93].

I.4.5.3. Densité

En raison de sa densité, le verre est particulièrement adapté pour l'isolation acoustique. Cependant, en règle générale le verre produit dans des épaisseurs très réduites par rapport aux autres matériaux de construction tels que la brique, le béton, le bois, etc., ce qui relativise la portée de cette affirmation. Pour obtenir des caractéristiques d'isolation acoustique optimale, il convient d'utiliser des éléments en verre isolant ou en verre feuilleté de sécurité spécial, dont l'épaisseur reste très réduite par rapport aux autres matériaux [81]. Ling et Poon [111] ont signalé une augmentation de la densité durcie des mortiers contenant du verre TRC (taille 0.15-5mm), le remplacement de sable naturel par les TRC est de 50% et 100% en volume. Le verre TRC a été utilisé sans traitement (ST) et avec traitement (T). Les résultats montrent une augmentation de la densité durcie des mortiers avec l'inclusion du sable de verre TRC. L'augmentation de la densité durcie est de 7,3% et de 14,6% avec l'inclusion de verre (ST) 50% et 100%, respectivement, est de 5,8% et 11,2% avec l'inclusion de verre (T), respectivement (Figure I.16).

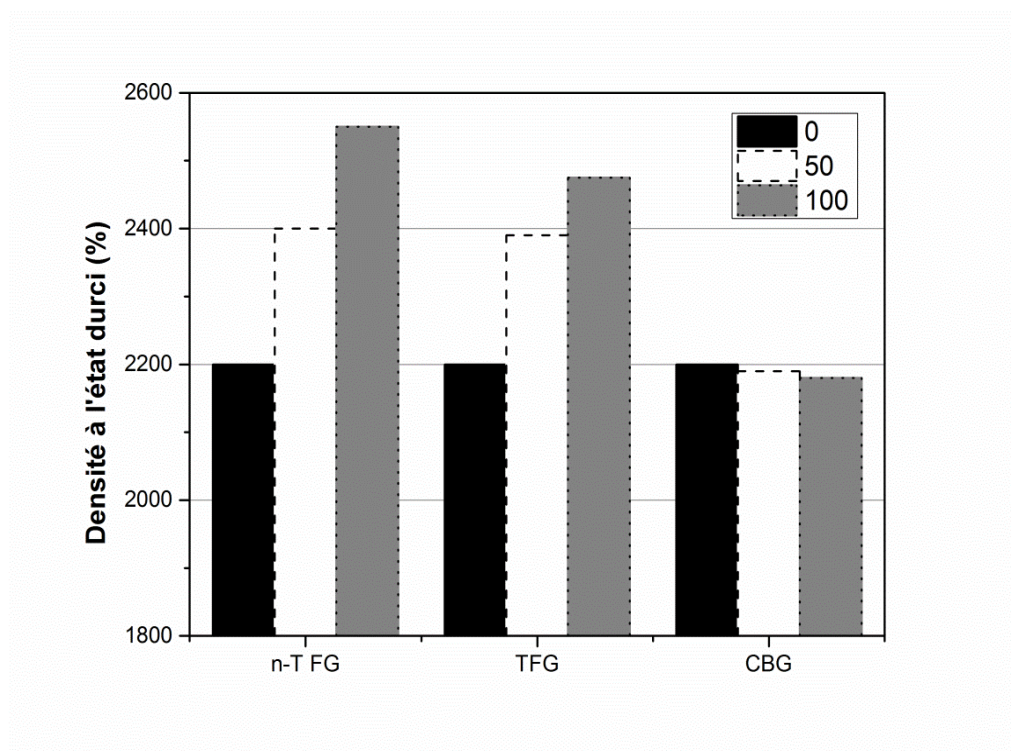


Figure I.16 : Densité à l'état durci en fonction de type et % du verre [111].

Plusieurs chercheurs [93, 95, 96] ont noté que l'inclusion de granulats de verre TRC dans la matrice cimentaire avec ou sans traitement augmente les densités à l'état frais et durci. Cet accroissement de la densité du mortier et du béton s'explique par le fait que le sable de verre TRC a une densité plus élevée que celle du sable naturel. Ling et Poon [112] rapportent l'augmentation de la densité durcie des mortiers à la densité plus élevée du verre TRC, en raison de la présence de plombs par rapport au sable naturel.

#### I.4.5.4. Module d'élasticité

Puisque le module d'élasticité du verre est supérieur à celui de granulat normal, on peut s'attendre à ce que l'incorporation de verre recyclé entraîne une augmentation de module l'élasticité du béton de verre recyclé. Bien que la présence de verre puisse entraîner une diminution de la résistance du béton, le module d'élasticité peut toujours être supérieur au béton sans granulat de verre recyclé, lorsque les rapports E/C sont similaires [81].

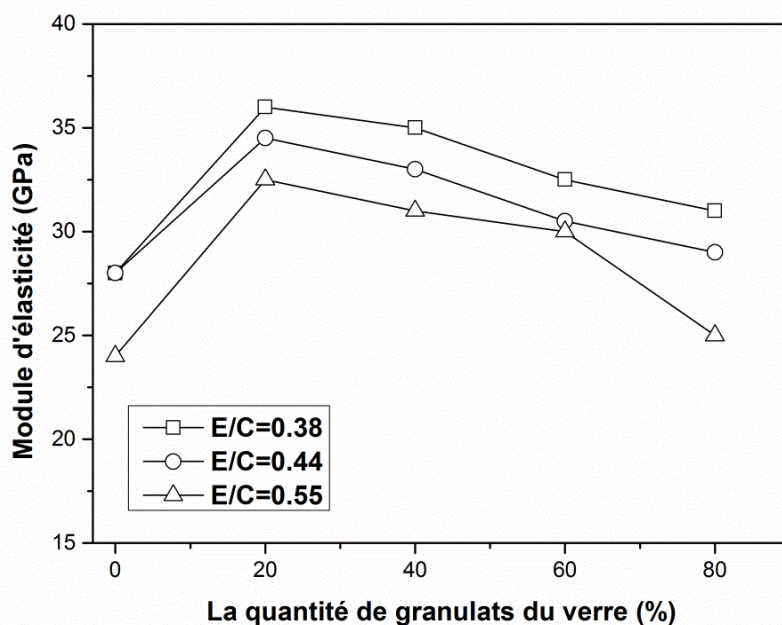


Figure I.17 : Module d'élasticité avec différent % de verre [113].

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.

Wang [113] a montré que, le béton avec 20% de granulat de verre a donné des valeurs de module d'élasticité les plus élevées. De plus, le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du remplacement de granulats de verre, ceci peut être dû à une diminution de la résistance, mais reste plus élevé que celui du témoin (Figure I.17).

wen et al [114]. ont rapporté une diminution du module d'élasticité statique des mortiers contenant du verre TRC (taille 4.75-0,6 mm) en tant que granulat fin à des niveaux de 20%, 40% ,60% ,80%et 75%,

#### **I.4.6. Influence de granulat de verre sur les propriétés de durabilité des bétons**

La durabilité peut-être définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans des bonnes conditions de service prévues pour l'ouvrage. La durabilité est liée aux plusieurs facteurs tel que : la température, l'humidité et l'agressivité chimique et mécanique des milieux environnants [115].

##### *I.4.6.1. Absorption d'eau*

L'absorption d'eau peut être décrite comme la capacité à absorber l'eau par aspiration capillaire. Ce mécanisme est fortement influencé par le volume de pores ainsi que par la connectivité du réseau des pores. Une fraction importante du béton en service n'est que partiellement saturée et la pénétration initiale de l'eau et des sels dissous est influencée, au moins en partie, par l'absorption capillaire [116]. L'absorption d'eau a été utilisée comme un facteur important pour quantifier la durabilité des systèmes cimentaires avec la zone des granulats [117].

Ling et Poon [96] ont rapporté une réduction du pourcentage d'absorption d'eau des mortiers contenant 100% de verre TRC comme granulat fin. Cette réduction du

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

pourcentage d'absorption d'eau est d'environ 22,68%, 17,52% et 13,4% avec l'inclusion de sable de verre avec des dimensions maximales de 5 mm, 2,36 mm et 1,18 mm et respectivement.

Liu et al. [118] ont réalisé une étude sur l'effet de verre TRC recyclé sous forme granulats fins dans un mortier de ciment. Pour cette étude le sable a été remplacé par le verre recyclé avec des teneurs de (25%, 50%, 75% et 100%). Les résultats montrent que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur de verre. La figure I.18 montre une réduction de l'absorption d'eau avec l'augmentation du contenu de verre. Cela peut être dû à la nature du verre TRC qui n'absorbe pas l'eau [111].

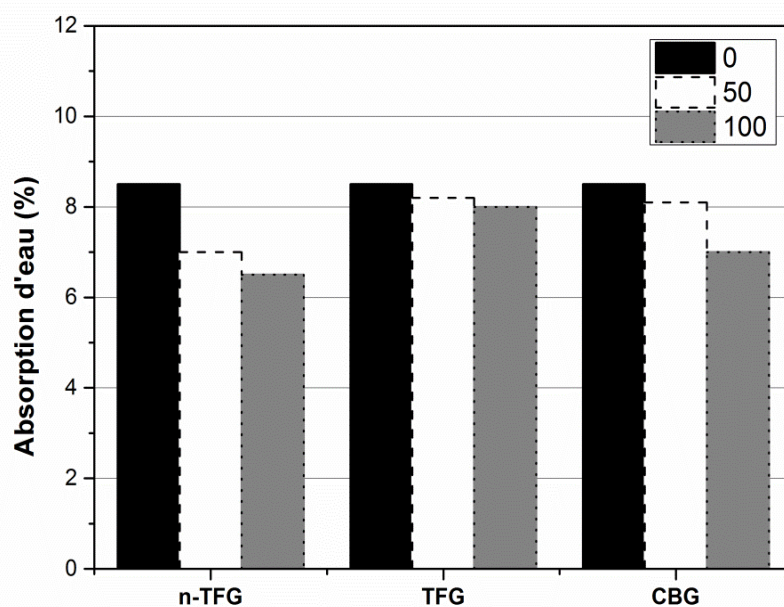


Figure I.18 : Absorption d'eau du mortier en fonction de type et % du verre [111].

### I.4.6.2. Retrait de séchage

Le retrait de séchage est la réduction du volume à température constante sans chargement externe. C'est une propriété importante qui affecte de manière significative la performance des structures à long terme, il influence également les propriétés structurelles

et la durabilité du matériau [119]. Ling et Poon [120]. Ils ont signalé à l'âge de 14 jours, que le retrait de séchage diminue avec l'augmentation de volume de verre TRC. Ils ont également observé que le rapport granulats/ciment (G/C) plus élevé conduit un retrait de séchage moindre comparativement au témoin. Des résultats similaires ont également été rapportés par Ling et Poon [121].

En conséquence, on peut noter que l'inclusion de granulats de verre TRC dans les mortiers et bétons réduit le retrait de séchage tel que rapporté par plusieurs recherches. La réduction du retrait de séchage en présence du verre TRC peut être liée à la faible d'absorption d'eau de verre [96, 97, 111].

Comme le montre la figure I.19, les valeurs de retrait de séchage diminuent avec l'augmentation de la teneur de verre recyclé [122]. Cependant, d'autres recherches ont rapporté un effet négatif de granulats de verre TRC sur le retrait de séchage. Ils rapportent cet effet négatif sur le fait que le retrait de séchage a une relation directe avec la résistance à la compression du mortier aux mêmes durées de durcissement.

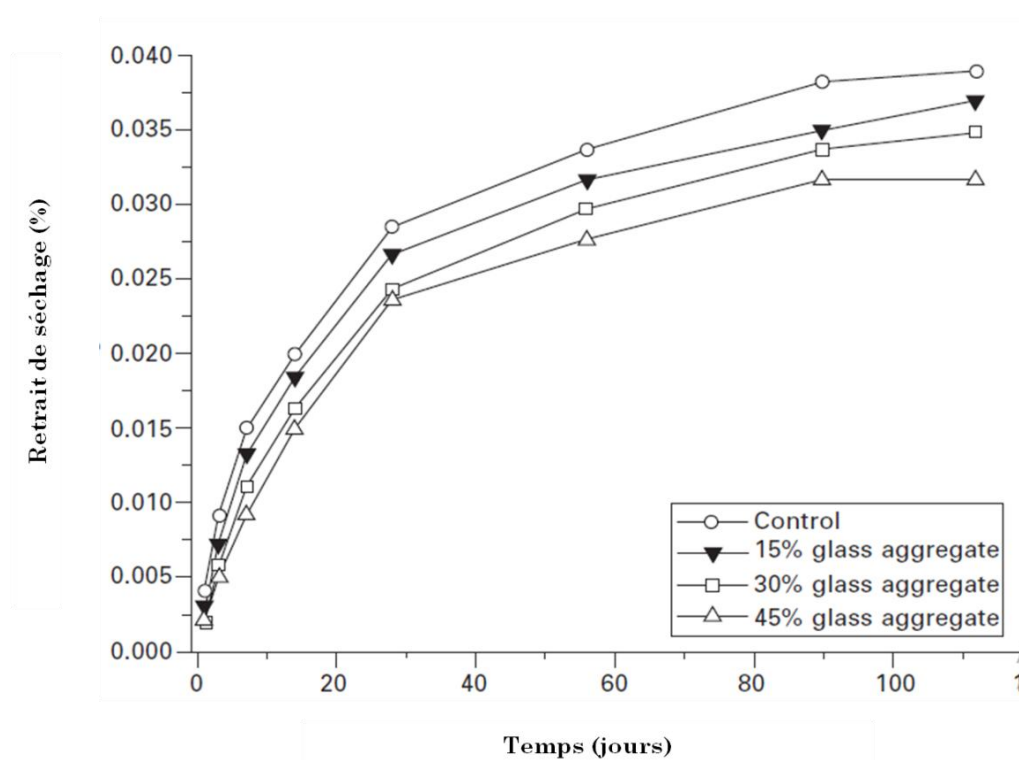
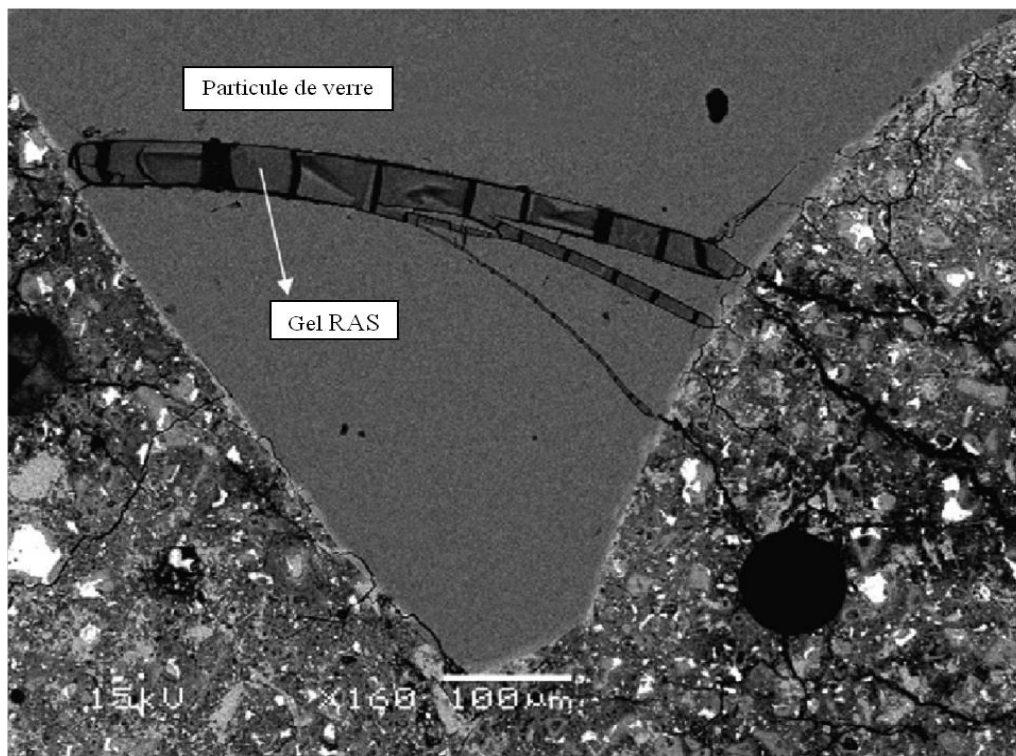


Figure I.19: Retrait de séchage de mortier avec différent % de verre TRC [122].

I.4.6.3. Réaction alcali-silice

L'utilisation des granulats de verres dans le béton affecte l'expansion et la fissuration. La réaction alcali-silice (RAS) est une réaction chimique entre la silice de verre et les ions hydroxydes du béton [123]. Les produits de cette réaction provoquent un gonflement et les pressions produites créent des microfissures dans les particules de verre qui endommagent le béton [124, 125]. Cette réaction peut aussi accélérer d'autres réactions qui à leur tour causent des ruines, comme le gel-dégel ou la corrosion des structures en béton armé [126]. La figure I.20 montre la particule de verre affectée par la réactivité alcali-silice (RAS) avec la formation de gel intra-particulaire dans le mortier.



*Figure I.20: La particule de verre affectée par la RAS montre la formation de gel intra-particulaire dans le mortier après 14 jours [127].*

La figure I.21 montre l'effet de GV sur la RAS dans le mortier et le béton avec le calcium de silicate hydraté secondaire (C-S-H), une dilatation et une fissuration très remarquable causée par les granulats de verre recyclés, ceci est due à la forte teneur en phase alcaline et en phase amorphe. Zhao et al. [90] ont rapporté que le remplacement de sable par le verre

**CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS  
L'INDUSTRIE DU BETON**

---

TRC a un effet négatif sur la RAS. Cependant nombreux chercheurs [97, 111, 128], affirment que les matériaux cimentaires tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, les fumées de silice et le métakaolin sont souvent utilisés pour réduire ou minimiser effet négatif de RAS.

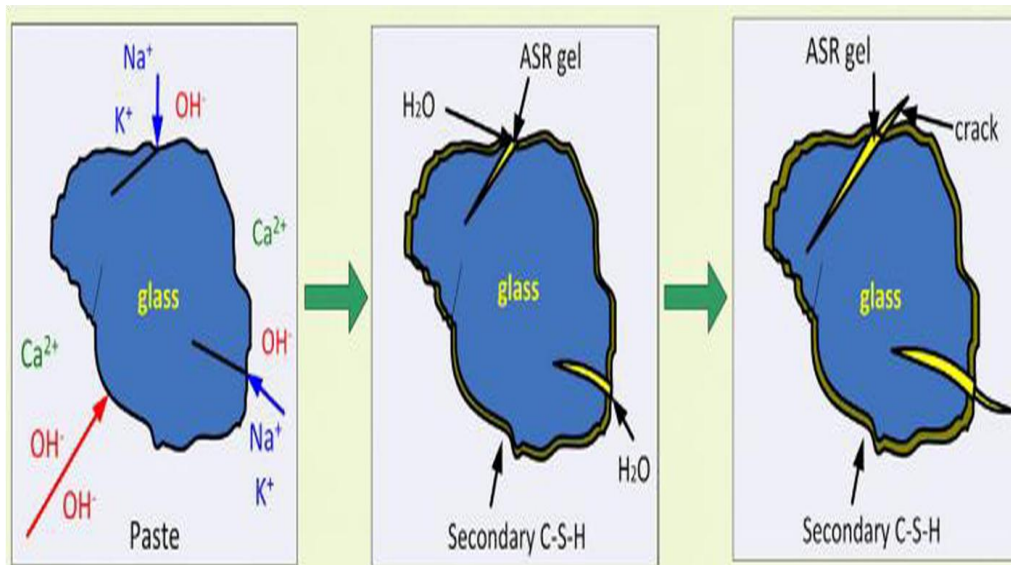


Figure I.21: L'effet de réaction alcali silice dans le béton/mortier [129].

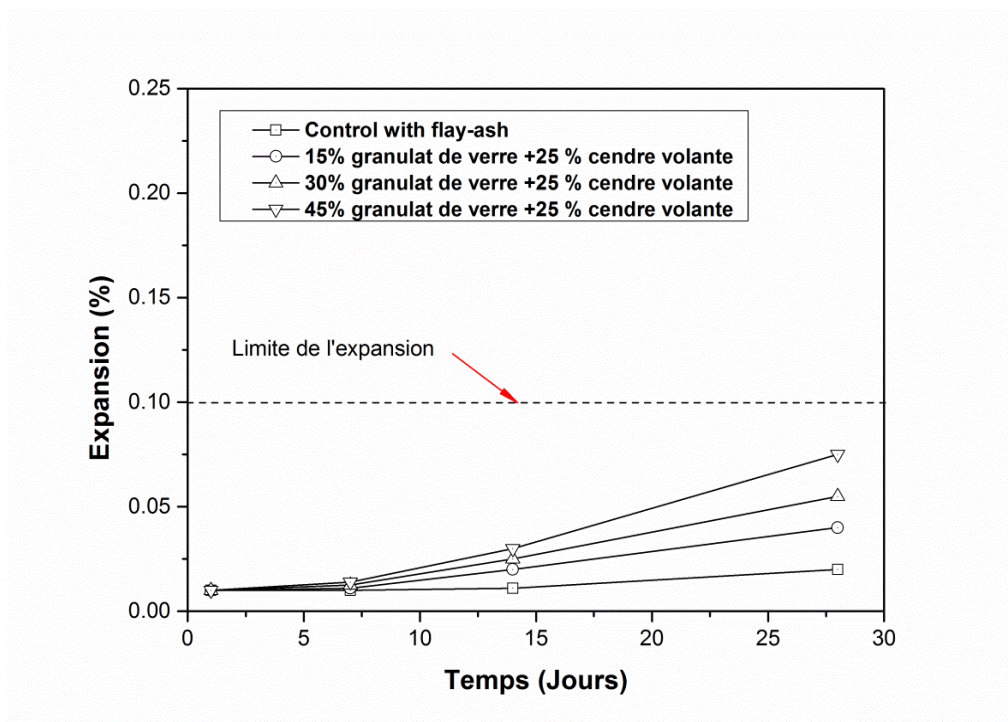


Figure I.22: L'effet de cendre volante sur la RAS [128].

La figure I.22 montre l'avantage de l'utilisation des additions minérales sur la réduction de phénomène de RAS. Les résultats montrent que les prismes en béton enregistrent une expansion extrêmement faible même avec une teneur en verre recyclé de 45%, ce qui montre que l'expansion était minimisée par l'utilisation des cendres volantes dans les mélanges de béton. Toutes les mesures sur les prismes à 28 jours montrent une expansion inférieure à 0,1% (teneur en cendres volantes de 25% en masse du liant total) [128].

#### I.4.6.4. Résistance à la pénétration aux ions chlorure

La corrosion induite par le chlorure de l'acier dans le béton est la principale cause de la durabilité des structures en béton armé qui sont exposées aux chlorures dans l'environnement. La résistance à la pénétration aux ions chlorure du béton avec l'inclusion de verre recyclé devient une préoccupation pour son application potentielle dans les structures [81]. La figure I.23 ci-dessous montre que la résistance à la pénétration des ions chlorures augmente avec l'augmentation de la teneur en verre recyclé.

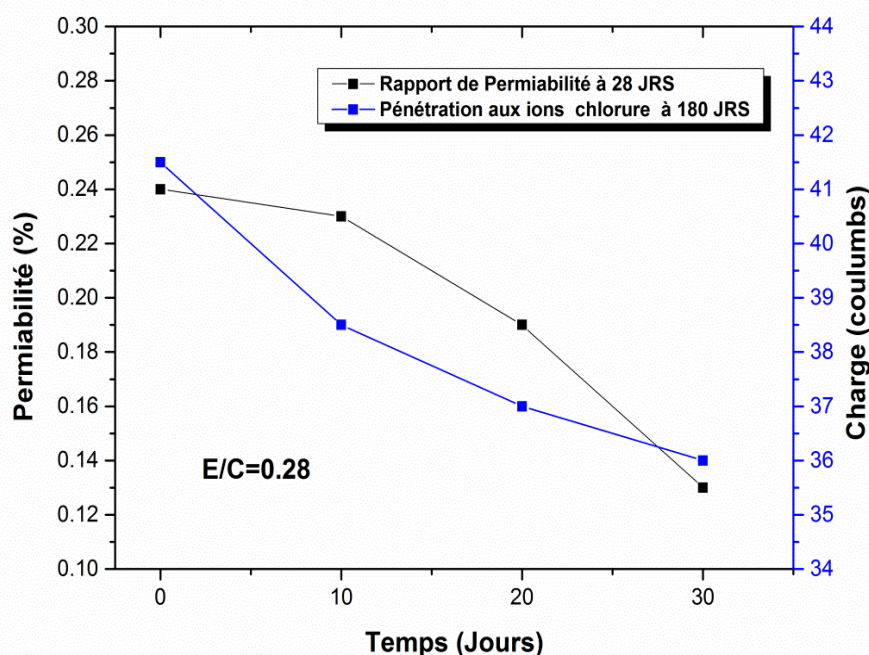


Figure I.23: Perméabilité de béton en fonction de % du verre [130].

Wang et Huang [113] ont montré que la perméabilité à l'âge de 28 jours et la pénétration des ions chlorures à 180 jours diminuent lorsqu'on remplace le sable naturel par les granulats du verre à des niveaux de 10%, 20% et 30% en poids. Cette réduction augmente avec l'augmentation de volume du verre.

Les résultats de Wang observent aussi que les valeurs se situent entre 750 C et 3250 C. Les spécimens contenant 80% de sable de verre recyclé sont les plus faibles pénétrations d'ions chlorures (750 C) qui se caractérisent par un faible niveau de pénétration.

#### I.4.6.5. Attaque de sulfate

Les ions de sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions de sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, le béton de verre recyclé présente une bonne résistance à l'attaque de sulfate par rapport au béton normal [81] (Figure I.24).

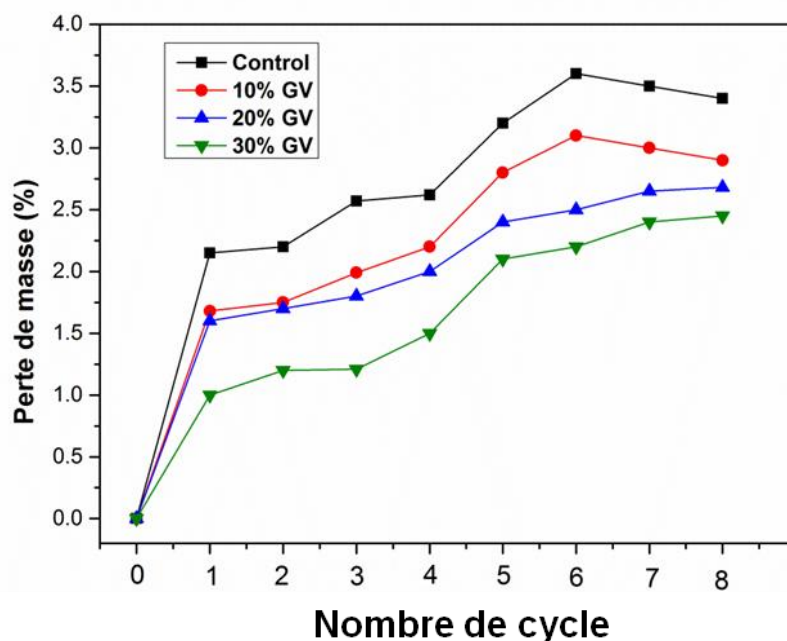


Figure I.24: Perte de masse du béton de GV contenu dans une solution de sulfate [130].

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

La figure I.24 illustre la perte de masse du béton avec différents contenants de verre recyclé dans des cycles de séchage alterné dans une solution de sulfate. On peut également voir à partir de la figure que la perte de masse a diminué avec l'augmentation de la teneur en verre. Ceci indique que l'addition de verre peut améliorer la résistance à l'attaque de sulfate pour le béton. L'amélioration de la résistance à l'attaque au sulfate peut être attribuée aux facteurs suivants. Tout d'abord, le verre est un matériau imperméable, la présence de verres recyclés peut réduire, l'absorption du béton, et ensuite augmenter la capacité à limiter la migration de l'eau et des ions [130].

### *I.4.6.6. Résistance aux gels-dégels*

En ce qui concerne la résistance au gel-dégel du béton de verre recyclé les effets du verre sur la sorption, la microstructure et la résistance être pris en compte. Selon Tuncan et al. [131], l'incorporation de verre recyclé et de cendres volantes dans le béton augmente la résistance du béton. Martín et al. [132] ont également constaté que le béton avec de granulats du verre donne une mauvaise résistance au cycle gel-dégel.

### *I.4.6.7. Carbonatation*

Ling et Poon [97] ont signalé une réduction de la résistance à la carbonatation avec l'augmentation de volume de verre, à l'âge de 90 jours la profondeur de carbonatation, augmente de 60% avec l'inclusion de 100% de verre. En effet, la résistance à la carbonatation est généralement associée aux vides présents dans le béton et la surface imperméable des granulats de verre recyclés aurait pu emprisonner plus d'air dans la matrice de béton, permettant ainsi de faciliter la pénétration de carbone dans le béton [133]. De plus, la liaison plus faible entre le verre et la pâte de ciment aurait peut-être rendu le béton plus susceptible à la carbonatation. Castro et Brito [134] ont enregistré une amélioration générale en termes de résistance à la carbonatation des bétons contenant des déchets de verre (taille <4 mm) comme granulats fins.

## I.5. BETON AUTOPLAÇANT

L'avènement du béton autoplaçant (BAP) marque une nouvelle étape dans l'histoire des matériaux en béton d'où l'idée des chercheurs japonais, qui ont essayé en 1980 de fabriquer des bétons répondants à ces exigences [135], et à ce titre, présente plusieurs intérêts techniques dans le domaine de la construction civile et du bâtiment (pompabilité, facilité et rapidité d'exécution, réalisation des formes complexe) bien qu'un autre aspect bénéfique pour les personnes ce qui contribué à la réduction des risques d'accidents et le coût de main-d'œuvre. La spécificité du BAP réside dans son comportement à l'état frais, c'est pourquoi ce type de béton doit être caractérisé par une grande maniabilité et déformabilité tout en restant stable [136]. Le BAP se caractérise généralement par des proportions de mélange qui incorporent différents additifs chimiques et minéraux dans des proportions définies nécessaires pour respecter les spécifications autoplaçantes et de sa stabilité vise à vise à la ségrégation [137]. Cependant, ces variations d'adjuvants chimiques et les matériaux cimentaires et les granulats secondaires compliquent ses propriétés rhéologiques [138]. Pour atteindre ces propriétés, la conception du mélange de BAP nécessite une grande quantité de ciment Portland et de superplastifiant (SP) [139]. Malgré les avantages multiples, l'emploi de BAP dans certaines applications peut conduire à des problèmes techniques et économiques, pour cette raison ces points restent à surveiller dans l'utilisation du BAP, car, le volume élevé de ciment Portland utilisée causent des problèmes tels que ; l'augmentation de la consommation de ciment, des incidences environnementales en raison des émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation d'énergie et de ressources naturelles, un fort dégagement chaleur d'hydratation associée à la fissuration du béton . De plus cette consommation élevée de ciment et la présence des superplastifiants entraînent un effet négatif sur l'augmentation de cout du BAP [140].

### I.5.1. Caractéristique des BAP à l'état frais

Bien que les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton peut ne pas être mis en place correctement, ses propriétés désirées ne seront pas obtenues. Pour chaque application, les caractéristiques

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

requis pour le béton frais sont différentes et définissent si un béton a des bonnes propriétés à l'état frais telles que ; les besoins de finition, de mise en place, de pompabilité, de résistance à la ségrégation,...etc [141].

Aujourd'hui, le développement des nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. Des nombreux ajouts cimentaires et adjuvants organiques ont fait leur apparition et viennent apporter des modifications importantes au béton. L'importance de la maniabilité et de sa mesure a pris du même coup une importance primordiale [142].

L'étude de comportement rhéologique du béton est indispensable pour le bon déroulement d'une construction, il permet de prédire l'énergie nécessaire pour le mettre en place. Le BAP est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex- vibration, damage) [143]. Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'autocompaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton ordinaire vibré (BOV) [144]. Dans le cas de ce dernier, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un BOV. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant : sa mobilité en milieu non confiné (capacité de passage), sa mobilité en milieu confiné (capacité de remplissage) et sa stabilité (vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage) [145].

La caractérisation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique des essais spécifiques. Des recommandations de caractérisation ont été préconisées par l'association française de génie civil (AFGC) [146] et les guides européens (EFNARC) pour le BAP [147]. Ces recommandations sont devenues in situ les essais de référence pour valider une formulation de BAP aussi répartissent les BAP à l'état frais en quatre (4) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais simples et empiriques à réaliser pour chacune d'elles.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

- La capacité au remplissage ;
- La capacité de passage ;
- La résistance à la ségrégation ;
- Rhéologie.

Ces tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais. Le développement de nouveaux appareils basés sur une approche plus fondamentale et rhéologique donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids: essais aux rhéomètres (Two-Point, BML, BTRHEOM, CEMAGREF-IMG, IBB, Lanos, ICAR...). Le tableau I.3 synthétise les différents essais empiriques de la caractérisation et le contrôle des propriétés à l'état frais des BAP les plus répertoriés dans la littérature [148]. La figure I.25 représente aussi une description et schématisation sur les différents essais de la caractérisation des BAP.

De nombreux chercheurs se tournent vers la science de la rhéologie pour concevoir de meilleurs outils pour comprendre l'ouvrabilité du béton. Cette science basée sur une méthode la plus utilisée pour placer le béton est le pompage de ce dernier, mais pour déterminer si le béton est pompable ou non, ses propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique doivent être connues [149].

La rhéologie est un domaine de la mécanique des fluides qui étudie l'écoulement des matériaux et l'interaction entre les états de contrainte et la déformation en fonction de leur viscosité, élasticité et plasticité et avec l'apparition de nouveaux matériaux et le comportement complexe de pompabilité du béton comme on a précisé ce point dans le paragraphe précédent, pour cela le domaine du génie civil s'intéresse à l'étude de l'écoulement du béton [150]. Dans le béton, la pâte ne représente que 30 à 40% du volume total. Bien que les propriétés d'écoulement du système soient directement régies par cette phase, car elles sont responsables d'impliquer les granulats et de combler les vides entre eux, et de promouvoir le mouvement relatif entre ces particules [151, 152].

**CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS  
L'INDUSTRIE DU BETON**

---

*Tableau I.3 recommandation des essais du BAP [147].*

Propriétés	Essais	Plages recommandées
Capacité de Remplissage	Étalement au cône d'Abrams (Slump flow) (NF EN 12350-8)	550 ≤ SF1 ≤ 650 mm 660 ≤ SF2 ≤ 750 mm 760 ≤ SF3 ≤ 850 mm
	Temps d'étalement (T50) (NF EN 12350-8)	VS1 < 2 s VS2 ≥ 2 s
	Essai à la boîte en U (U-Box) (Hayakawa, 93)	Hauteur de remplissage ≥ 30 cm
Capacité de Passage	Étalement à l'anneau (J-ring) (NF EN 12350-12)	PJ1 ≤ 100 mm à 12 barres PJ2 ≤ 100 mm à 16 barres
	Écoulement à l'entonnoir (V-Funnel) (NF EN 12350-9)	0 > VF1 < 9 s 9 ≤ VF2 ≤ 25 s
	Essai à boîte en L (L-Box) (NF EN 12350-10)	PL1 ≥ 0.8 à 2 barres PL2 ≥ 0.8 à 3 barres
Résistance à la ségrégation statique	Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11)	SR1 ≤ 20% SR2 ≤ 15%
	Essai de la colonne (Otsuki et al., 96)	Ginf – Gsup ≤ 5%

# CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

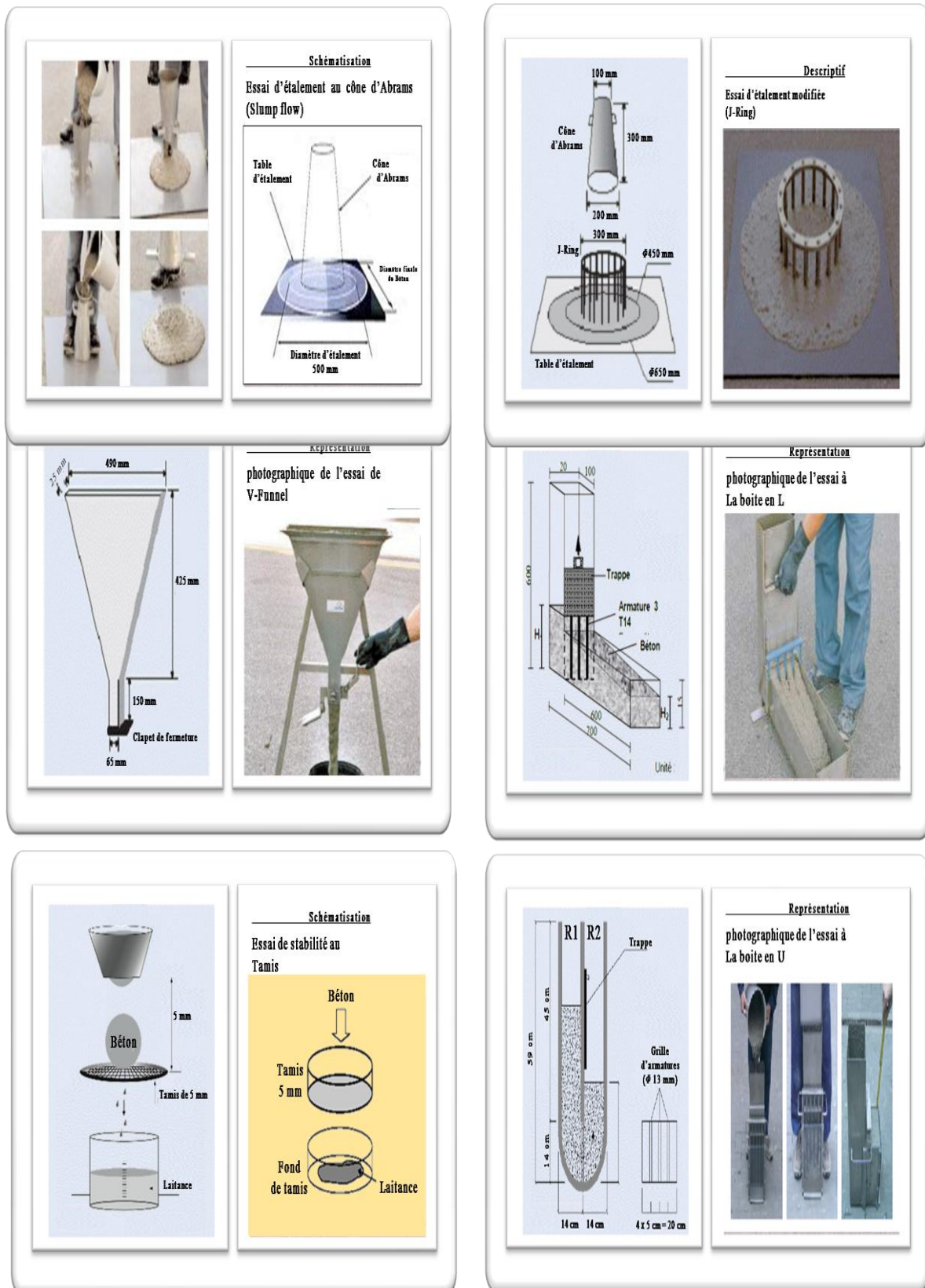


Figure I.25 : Différents essais pour la caractérisation des BAP.

### **I.5.2. Formulations et Compositions des BAP**

Les différentes propriétés des BAP (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, seuil de cisaillement, etc.), rendent leur formulation relativement compliquée. Même si des nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un BAP à partir des données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis [153-155].

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 acquise ces dernières années, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation; les dosages en SP et en fines ne sont donc pas bornés. Des multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et quelques de ses modifications [156].

#### *I.5.2.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)*

Cette formulation proposée en 1993 par l'équipe du professeur OKAMURA émane de l'idée selon laquelle seul un ciment Portland à faible chaleur d'hydratation ou un ciment Portland riche en bélite est susceptible de générer des matériaux poudreux. Fort de ce principe, on peut donc s'attendre, une fois l'autocompactibilité obtenue, à ce que le béton durci atteigne lui aussi les performances recherchées. Pour tenir compte des variations qui peuvent se produire dans le processus de fabrication (quantité des matières, erreurs de pesages, etc.), on fixe au préalable une exigence d'autocompactibilité légèrement plus sévère que la valeur théoriquement nécessaire. La formulation comporte en fait cinq étapes [157]:

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

➤ 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 ;

$$G = \frac{50}{100} G_{lim} (1-A) \quad \text{Eq : I.2}$$

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 ;

$$S = \frac{40 (1 - A - G)}{100 (1 - K_{sf})} \quad \text{Eq : I.3}$$

$K_{sf}$  : 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.

La fluidité du mortier, donnée par:

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \quad \text{Eq : I.4}$$

D : est le diamètre de la galette et  $d_0$  la base du cône.

➤ Le temps d'écoulement du mortier, donnée par:

$$T = \frac{10}{t} \quad \text{Eq : I.5}$$

T : le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de D est élevée, plus le mortier fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de T est faible, plus

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

la viscosité de mortier élevée). Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément :

Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un BAP satisfaisant.

### *I.5.2.2. Formulation LCPC (France)*

Au laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), un modèle mathématique a été développé par De Larrard et al en 1994, ce modèle est basé sur l'empilement granulaire entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après [\[158\]](#) :

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions du mélange ;
- La compacité propre ;
- La densité apparente.

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 (effet de paroi).

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

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

### *I.5.2.3. Formulation CBI modifiée*

La principale modification et extension de la méthode CBI est apportée par Bui et al dans [159], qui ont proposé un critère supplémentaire pour obtenir un BAP. 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 BAP, grâce à une base de données importante de formulations de bétons [160]. L'espacement moyen entre les particules varie selon les auteurs entre 0,3 et 1mm.

### *I.5.2.4. Formulation japonaise*

La démarche proposée en 1998 par la société japonaise de génie civil [161] 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'autocompactibilité désirée. Il est situé entre 0.30 et 0.32 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m<sup>3</sup>;

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

➤ Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre 85 et 115% en volume ;

➤ La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5%d'air ;

➤ Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en général  $0.13\text{m}^3/\text{m}^3$ . Dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre  $0.16$  et  $0.19\text{m}^3/\text{m}^3$  ;

➤ La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau et air) ;

➤ Le dosage de SP et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de SP dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les SP de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par  $\text{m}^3$ , ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres ;

➤ Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à 5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

### I.5.3. Application des BAP

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations sur chantiers et en usine de préfabrication, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années

pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration. Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiment ou de génie civil, et pour l'exécution des tunnels et de nombreux produits préfabriqués en béton, et dans les travaux d'assainissement et de réhabilitation. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, plancher, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, etc.). Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate [162].

#### **I.5.4. Application des BAP en l'Algérie**

À ce jour aucun ouvrage n'a été construit par 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 SP, mais pas pour autant que ça soit du béton autoplaçant. Ce type de béton reste basé sur les compétences développées au sein des universités algériennes par plusieurs chercheurs avec différentes réalisations, parmi eux on cite quelque recherche :

Boukendakdji [163] a étudié l'effet de laitier granulé algérien comme ajout cimentaire et les paramètres de formulation sur les propriétés des BAP. Pour cette étude deux SP a été utilisé l'un à base de polycarboxylate (PC) et l'autre à base Polynaphtalène Sulfonate (PNS). Il a constaté que la teneur en laitier de 20% peut donner un bon BAP sans ressuage ni ségrégation, de plus a observé aussi que le superplastifiant PC est plus efficace, du point de vue sur les propriétés rhéologiques, que le superplastifiant PNS. Concernant les résistances mécaniques plus le % de laitier augmentent la résistance diminuent.

Belaidi [164] a étudié l'influence des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels (pouzzolane naturelle + la poudre de marbre) sur le comportement rhéologique et la durabilité de BAP. Il a montré que la teneur de pouzzolane inférieure à 15% peut donner un bon BAP sans ressuage et ségrégation. Cependant l'utilisation de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle de 40 à 50% a apporté un effet bénéfique sur

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

l'ouvrabilité. Pour les résistances mécaniques à noter aussi que ce dernier diminue avec les mélanges binaires seuls ou bien pour les mélanges ternaires. Du point de vue de durabilité la combinaison de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle a apporté un effet bénéfique sur la résistance aux attaques par les sulfates de sodium.

Bouziani [165] a présenté une approche de modélisation de la formulation du mélange des BAP avec différents types de sable (binaire et ternaire), pour évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques. Les résultats indiquent que la conception statistique offre un outil visuel simple qui fournit des modèles mathématiques pouvant être utilisés pour faciliter les résultats dans des tracés de contour des mélanges ternaires.

Safi et al. [166] ont orienté leur recherche vers l'utilisation des déchets plastiques comme granulats fins dans les mélanges des mortiers autoplaçants (MAP). Le sable a été remplacé par les déchets plastiques à des niveaux de 0%, 10%, 20%, 30% et 50% en poids du sable. Selon leurs résultats obtenus, une réduction de la résistance à la compression de 15% et 33% pour les mortiers contenant 20 à 50% de déchets plastiques respectivement. De plus ont constaté aussi d'après l'étude microscopique il y'a une bonne adhérence entre le plastique et la pâte de ciment.

Benabed [167] a examiné l'influence de la qualité et de la nature des sables locaux sur les performances et la durabilité des BAP. Différents 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 trouvé que les performances rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons à base des sables concassés et alluvionnaires binaires sont meilleures que celles sables binaires concassés et dunaires essentiellement pour des teneurs plus élevées en sable de dunes. De point de vue de durabilité sur la résistance aux agressions chimiques, l'incorporation de sable dunaire donne un effet négatif sur la résistance aux attaques des acides et des sulfates.

Boucetta [168] a travaillé sur la contribution des additions minérales et industrielles (laitier granulé, poudre de verre et filler calcaire) sur les propriétés d'écoulement et la

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

durabilité des BAP. À cette investigation le ciment remplacé par des taux de substitution différente. Les résultats observent que l'incorporation des additions dans les BAP améliore les paramètres rhéologiques par rapport au béton de référence. Pour la durabilité le laitier granulé et la poudre de verre sont bien meilleurs que les fillers calcaires.

Haddadou et al. [169] ont testé l'influence des fibres d'acier sur le comportement du BAP incorporant un volume élevé de poudre de marbre. Les résultats de leurs recherches ont montré que les fibres d'acier dans le BAP nécessitent un dosage élevé en SP afin d'obtenir des maniabilités similaires au béton de référence. Par contre, l'utilisation de volume élevé de poudre de marbre avec les fibres d'acier donne un meilleur comportement rhéologique, quelle que soit la teneur des fibres utilisées.

Ghernouti et al. [170] ont analysé le fait des fibres des sacs plastiques (FSP) sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci du BAP. Dans cette étude les fibres plastiques préparées avec différente longueur (2,4 et 6 cm) et fraction volumique (1, 3, 5 et 7 kg/m<sup>3</sup>). Les résultats montrent que les mélanges à base FSP avec longueur de 2 cm remplissent les critères du BAP quelle que soit la teneur en fibres. Ils ont remarqué aussi que l'incorporation de FSP ayant un effet significatif sur les résistances à la compression, elle a un effet important sur la valeur de la résistance à la traction à 28 jours.

A. Boukhelkhal et al. [171] a étudié l'influence de l'ajout de la poudre de marbre sur le comportement physico-mécanique et la durabilité des BAP. Pour cette étude un rapport E/P et un dosage en SP fixe avec 0,4 et 0,9% respectivement. Les résultats ont montré que l'incorporation de la poudre de marbre améliore le comportement rhéologique et la résistance à l'attaque des sulfates des BAP tandis que les résistances mécaniques diminuent. Il a observé aussi le point bénéfique de l'utilisation de la poudre de marbre concernant la diminution du coût de production du BAP.

Irki et al. [172] ont étudié l'effet de la longueur et la fraction volumique des fibres métallique (FM) sur le comportement du BAP. Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de FM avec une fraction volumique plus élevée et une longueur plus longue

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

diminue la maniabilité de béton, réduit sa capacité de passage et augmente le risque de blocage. Les performances mécaniques du béton en termes de résistance à la flexion et de module d'élasticité ont été améliorées, la résistance à la compression ayant légèrement diminué avec une augmentation de la teneur en fraction volumique du FM.

Irki [173] a contribué selon leur recherche à l'étude de la réparation des structures endommagées par des BAP fibrés. Les résultats constatent que l'utilisation des BAP comme matériaux de réparation donne une simplicité dans le remplissage du moule de réparation. Pour les caractéristiques mécaniques du béton ordinaire renforcé par le BAP ont été améliorées de 30% pour la résistance à la compression et de 20% pour la résistance à la traction de 40%.

Irki et al. [174] ont conçu un MAP avec différentes finesses (3900, 4300, et 5200 cm<sup>2</sup>/g) et pourcentage de substitution (0, 5, 10, 15 et 20%) de la poudre de brick. Les résultats expérimentaux ont montré que la substitution du ciment par la poudre de brique avec une teneur plus élevée (20%) diminue l'étalement du MAP (environ 3%) et réduit sa capacité au passage (environ 30%). 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 reste constant. Les performances mécaniques des mortiers en termes de résistance à la compression et à la traction ont été améliorées de 13 et 105% respectivement.

Omrane et al. [175] ont fait une recherche sur les performances et la durabilité du BAP à base de granulats de béton recyclé (GBR) et de pouzzolane naturelle (PZ). Les résultats ont constaté que, 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 ont également diminué la perte de masse sous l'attaque d'acide sulfurique.

Salhi et al. [176] ont étudié l'effet des traitements de la cure sur les propriétés des BAP. Les résultats ont observé que la période de traitement initial à l'eau à 7 jours, suivie d'une

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

maturation par temps chaud, est meilleure par rapport aux quatre autres méthodes de traitement de la cure.

Irki et al. [177] ont formulé des MAP avec différents pourcentages des fibres végétales traitées avec 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 et 3% par rapport au volume de mortier. Les auteurs ont constaté que les formulations optimales doivent utiliser des fibres traitées à 3% avec (10% de NaOH + résine époxy). Ces formulations présentent des performances mécaniques supérieures à celles de tous les mélanges testés après 28 jours de durcissement, avec une résistance à la compression de 20% et une résistance à la traction de 40%.

Kouider Djelloul et al. [178] utilisent une approche qui consiste sur la substitution massique du ciment par le laitier granulé 0%, 15% et 30% et sur la substitution volumique du sable par les granulats de béton recyclés (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %) dans les mélanges du BAP. Les résultats montrent que l'utilisation combinée des granulats de béton recyclés et de laitier a eu un effet significatif sur les propriétés à l'état frais et durci des BAP. L'ajout des granulats recyclés jusqu'à 50 % améliore la maniabilité des mélanges, tandis que l'ajout de 50 % à 100 % des granulats recyclés diminue l'ouvrabilité, quelle que soit la teneur en laitier utilisée.

D. Boukhelkhal et al. [179] ont étudié l'effet des additions minérales et la température sur le comportement physico-mécanique de BAP. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température entraîne une amélioration des performances mécaniques que ce soit à jeune âge ou à long terme. Cependant, la température de 40 ° est considérée comme la température optimale.

Bensaci et al. [180] ont examiné l'influence des granulats de caoutchouc recyclés sur les performances du BAP. Les fines de caoutchoucs (0-2 mm) de pneus usés ont été ajoutées avec une substitution volumique par le sable avec différents pourcentages (5, 10, 15, 20 et 30%). Ils ont conclu que l'inclusion de caoutchouc diminue l'ouvrabilité, la capacité de passage et augmentent la possibilité de blocage. Une diminution de la résistance à la compression est observée avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Par ailleurs,

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

l'incorporation des granulats de caoutchouc améliore de façon remarquable la conductivité thermique.

Benyahia et al. [181] ont étudié le comportement des MAP de réparation à base de pouzzolane naturelle en climat chaud. Les résultats ont montré que 30% de pouzzolane naturelle possible de produire des matériaux de réparation compatibles dans cet environnement chaud.

A. Boukhelkhal [182] ont étudié le comportement physico-mécanique et durabilité en climat chaud des mortiers autoplacants à base d'ajouts binaires et ternaires. Les résultats montrent une amélioration des résistances à la compression et à la flexion et de la vitesse d'auscultation sonore avec l'accroissement de la période de cure dans l'eau. Une période de cure dans l'eau d'au moins 7 jours semble nécessaire dans un climat chaud et sec pour obtenir des performances mécaniques acceptables. De plus l'utilisation des additions minérales a montré une contribution variable entre positive et négative selon leurs types et leurs pourcentages vis-à-vis de la réduction des dommages causés par les attaques acidiennes.

Skender et al. [183] ont examiné l'influence de filler calcaire comme ajout cimentaire et comme granulat fin sur la durabilité du BAP. Les résultats ont montré une diminution de la diffusion de l'eau et des ions chlorures pour les bétons à base 15 % de filler calcaire pour le remplacement du sable, tandis que l'augmentation enregistrée pour la perméabilité à gaz. Néanmoins le remplacement du ciment à 5% de filler calcaire donnée une amélioration de la résistance à la compression et de la diffusion des ions chlorure par contre la perméabilité à l'eau et la perméabilité à gaz diminuent à 15% de substitution.

Sahraoui et Bouziani [184] ont mené une investigation ayant pour but d'étudier l'influence de type de sable et l'effet de la combinaison des sables (binaire et ternaire) sur les propriétés rhéologiques du BAP, pour cette étude trois sables ont été utilisés ; sable alluvionnaire (SA), sable concassé (SC) et sable de dune (SD). Les résultats montrent que la

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

plus faible valeur du seuil de cisaillement (environ 44 Pa) a été obtenue pour un mélange à dosage de 30% de SA, 40% de SC et 30% de SD.

Laidani et al. [185] ont testé des BAP comportant de la bentonite calcinée. Pour cette étude deux types de bentonite ont été utilisés l'une bentonite de Maghnia et l'autre bentonite de Mostaganem. Ces auteurs ont montré que la substitution volumique de la bentonite par le ciment dans les mélanges du BAP diminuée leur comportement rhéologique, des observations à l'état durci ont indiqué que l'introduction de la bentonite avec 10-15% pour les deux bentonites avaient une résistance à la compression plus élevée jusqu'à 90 jours, ainsi la porosité et les propriétés de transfert améliorées avec les mêmes taux de substitution (10-15%).

Hadj aissa et al. [186] ont étudié l'influence de tuf calcaire sur les propriétés à l'état frais et l'état durcis des BAP. Pour cette étude 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 la force maximale à 28 jours était obtenue avec 10% de TC. En outre, l'analyse microstructurale indique des bonnes observations d'adhérence entre le TC et la matrice de ciment.

Barkat, et al. [187] ont contribué une étude sur l'effet de l'addition locale de métakaolin et calcaire comme ajouts cimentaires sur la rhéologie et les performances mécaniques de BAP. Les résultats des tests ont indiqué que le MK produit a 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 incorporant des fines calcaires améliore les propriétés rhéologiques (fluidité, capacité de passage et résistance à la ségrégation) ainsi que les performances mécaniques et de durabilité.

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

Benyamina et al. [188] ont examiné une étude sur l'influence des fines de calcaire de carrière du sable concassé fabriqué sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du BAP. Les résultats observent que tous les mélanges des BAP étudiés ont atteint un remplissage, une capacité de passage adéquat et ne présentent aucune ségrégation. De plus, l'inclusion des fines de calcaire comme substitution du sable concassé réduit l'absorption capillaire de l'eau, la migration des ions chlorure et améliore par conséquent les performances de durabilité.

Zmir et al. [189] ont renforcé le béton vibré par un BAP fibré. Les résultats montrent que le renforcement du béton ordinaire (BO) par chemisage de BAP fibré améliore les caractéristiques mécaniques et donne une bonne rigidité de béton endommagé.

## I.6. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette étude bibliographique a été effectuée d'une part pour faire le point des travaux de recherche sur les BAP et d'autres part sur l'utilisation des co-produits et déchets et leurs effets sur les caractéristiques et les performances des mortiers et bétons afin de maîtriser la présente étude en effectuant un travail lié directement à la bibliographie.

Dans cette partie de la revue bibliographique nous avons axé notre recherche sur l'intérêt de l'incorporation des granulats de verre (GV) et le métakaolin (MK) dans l'amélioration des performances des bétons. D'après l'analyse documentaire effectuée, toutes les études expérimentales ont été réalisées sur l'effet de GV ou le MK seul, il n'y a aucune étude relative à la combinaison entre ces matériaux. De plus, cette recherche portera sur l'influence de la combinaison de ces deux matériaux sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des BAP écologiques.

Les BAP qui sont considérés comme béton fluide par excellence. Il s'avère ainsi que les principales propriétés d'ouvrabilité d'un BAP sont le remplissage, la résistance à la ségrégation et la capacité de passage dans les milieux confinés et fortement ferrailés. Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés.

La réutilisation des déchets de verre en tant que matériau de construction est un moyen prometteur pour réduire la quantité de verre éliminée dans les décharges du monde entier, réduire la consommation des minéraux naturels et minimiser leur effet néfaste surtout sur l'environnement.

La littérature examinée a rapporté que la présence de verre comme granulats dans les mélanges de béton/mortier avoir d'une part des effets négatifs sur quelques propriétés telles que : la résistance à la compression, la perméabilité et réaction alcali-silice. D'autre part l'utilisation de verre offre un avantage en termes de l'ouvrabilité, l'absorption, retrait de séchage et sur l'attaque agressive par les sulfates.

L'utilisation des matériaux pouzzolaniques comme le métakaolin dans les systèmes cimentaires est une bonne option, car elle permettrait de réduire la quantité de CO<sub>2</sub> émise

## CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GV ET LE MK DANS L'INDUSTRIE DU BETON

---

dans l'atmosphère et peut améliorer la durabilité du matériau produit. L'effet avantageux du MK 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.

## **CHAPITRE II**

### **MATERIAUX ET ESSAIS**

# CHAPITRE II

## MATÉRIAUX ET ESSAIS

### II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présente en première partie les matériaux utilisés pour la confection des mortiers et des bétons étudiés avec leurs caractéristiques. On s'intéressera par la suite la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des bétons. Dans une seconde partie, on exposera les différentes procédures expérimentales de fabrication, aux séquences de malaxage, de mise en place et de la conservation des différentes éprouvettes. Pour finir, on présentera les essais réalisés en laboratoire sur les mortiers et les bétons à l'état frais et à l'état durci.

### II.2. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

#### II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland artificielle (CEM I 42.5 R) qui est conforme à la norme EN 197-1: 2000 [190]. Sa surface spécifique est de 3300 cm<sup>2</sup>/g, sa densité est de 3,12. Les compositions minéralogiques, ainsi que les propriétés chimiques et physiques du ciment sont présentées dans le tableau II.1.

#### II.2.2. Metakaolin

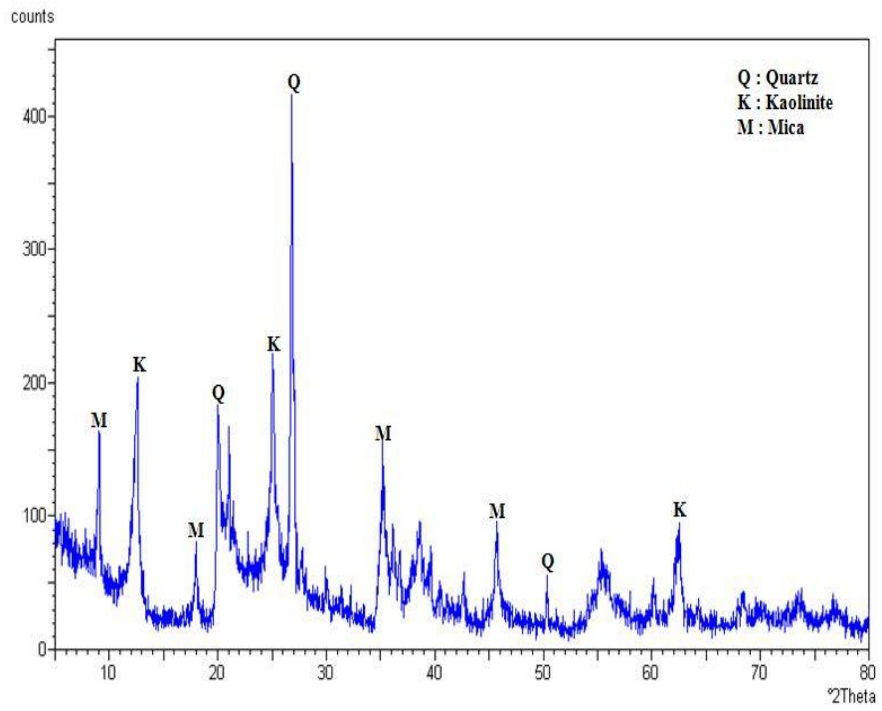
Le MK utilisé est sous forme brute de gisement Tamazirt, Jijel, la calcination du kaolin a été assurée à l'aide de four à une température de 850 C°, pendant 3 heures pour la transformation du kaolin en MK [57], la calcination entraîne la deshydroxylation et une destruction de la structure cristalline initiale de la kaolinite (kaolinite calcinée), par la suite ce dernier a subi un broyage dans un broyeur à boulets au laboratoire de l'université de Laghouat. Les compositions minéralogiques du kaolin et du MK ont été déterminées

par diffraction des rayons X (DRX) et les résultats sont présentés dans la figure I.1. Cette figure montre que, la composition minérale qualitative du MK est constituée de quartz (Q) et de mica (M). L'absence de kaolinite indique que lors de la calcination, la kaolinite est transformée en une phase amorphe potentiellement réactive avec le composant cimentaire  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Les propriétés chimiques et physiques du MK sont également présentées dans le tableau II.1

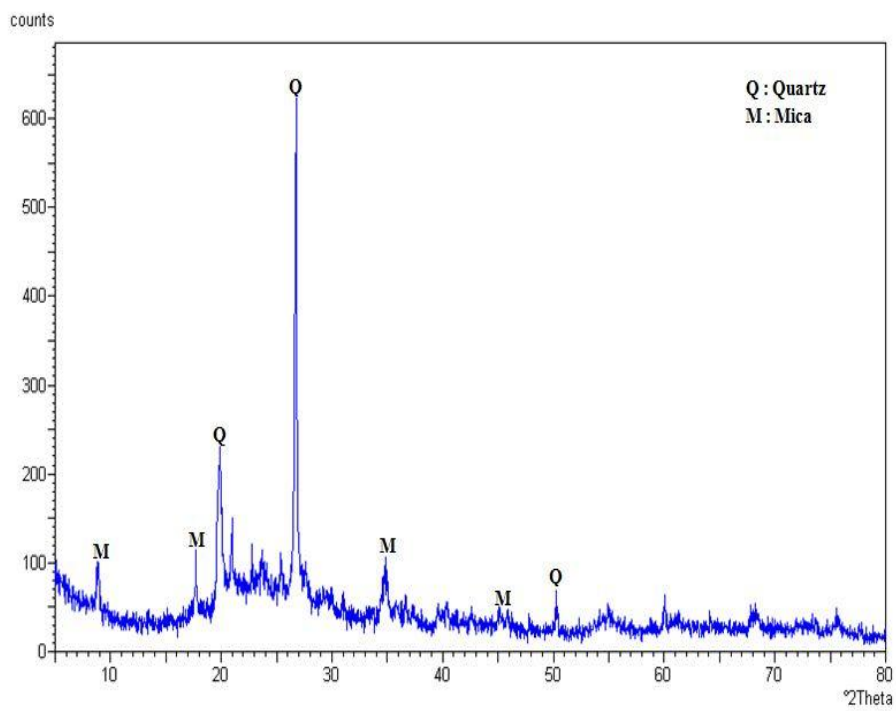
La figure II.2 montre les résultats de l'observation par microscope électronique à balayage (MEB) de ciment et MK utilisés. Comme on peut le voir, les poudres possèdent, des tailles irrégulières, plus fins et semblent avoir des particules de forme moins angulaire.

**Tableau II.1.** Compositions chimiques et propriétés physiques de ciment et MK

Élément (%)	Ciment	MK
<b>Propriétés chimiques</b>		
SiO <sub>2</sub>	20,83	50,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,13	41,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,58	1,5
CaO	62,19	0,08
MgO	1,42	0,4
K <sub>2</sub> O	2,30	0,81
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,09
TiO <sub>2</sub>	0,028	0,024
Pert eu feu	2,04	5,77
<b>Propriétés physiques</b>		
Densité	3,12	2,45
Finesse de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3300	7000



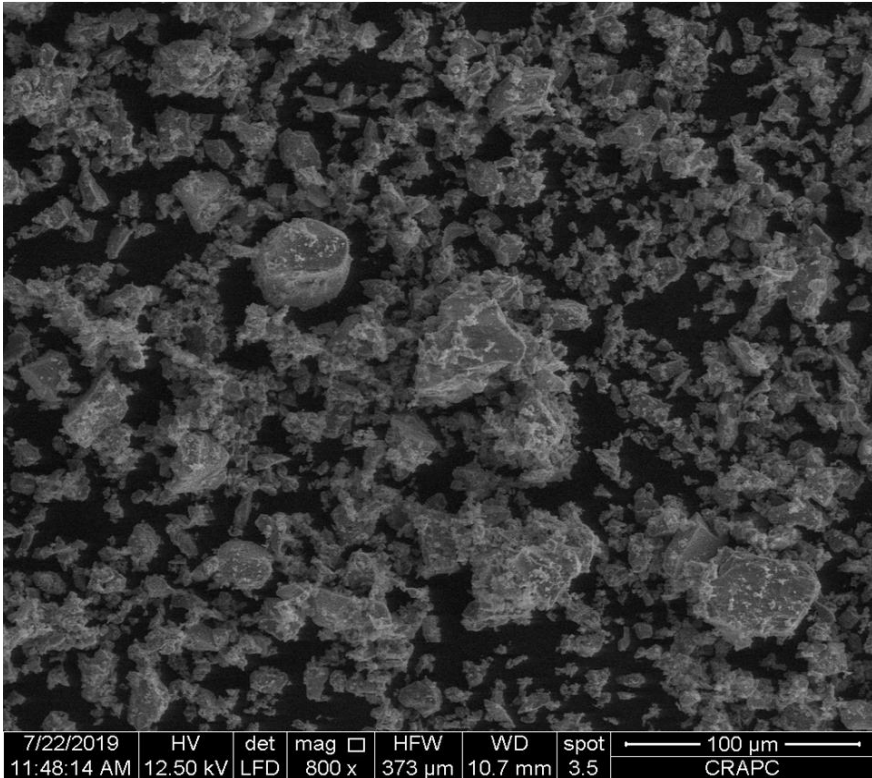
(a)



(b)

Figure II.1: Analyse minéralogique par DRX (a) kaolin, (b) MK

(a)



!

(b)

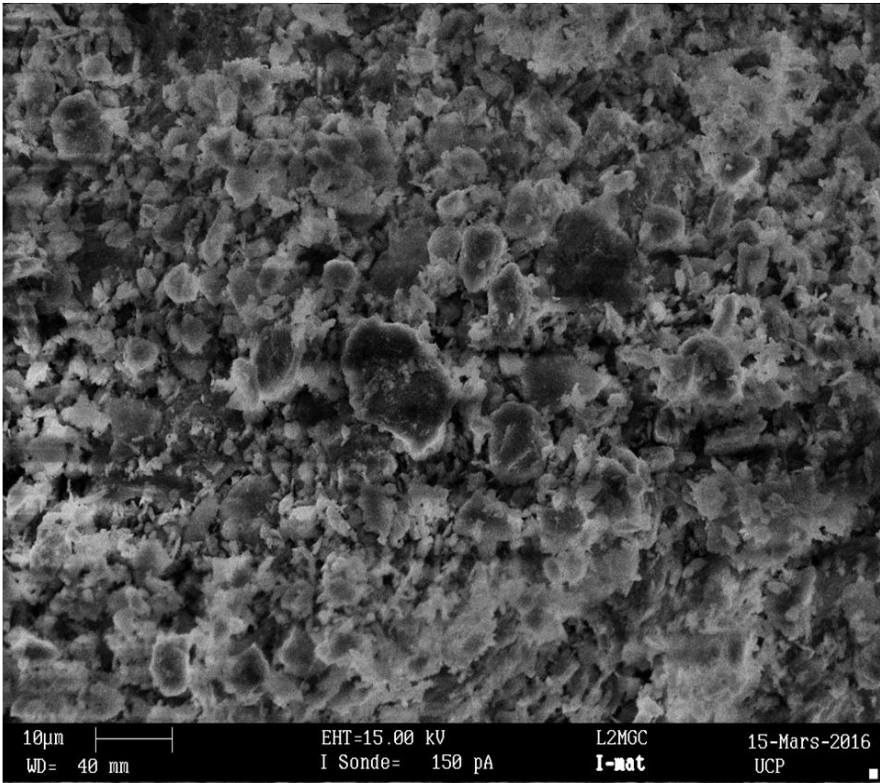


Figure II.2: SEM observation (a) ciment, (b) MK.

### II.2.3. Sable

Le sable utilisé dans notre travail est un sable alluvionnaire (SA) provient de la région de Laghouat Oued M'Zi. La courbe de l'analyse granulométrique et les caractéristiques physiques de SA utilisé sont données dans la figure II.3 et le tableau II.2 respectivement.

### II.2.4. Gravier

Deux graviers issus de concassage des roches calcaires (G 3/8 et G 8/15) sont utilisés dans cette étude. Les courbes de l'analyse granulométrique ainsi que les caractéristiques physiques des graviers sont présentées également dans la figure. II.3 et le tableau II.2 respectivement.

*Tableau II.2. Propriétés physiques d'identification des granulats utilisés*

Caractéristiques	Granulats Fin		Gros granulats	
	Sable 0/5	Verre 0/5	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Provenance	Oued M'Zi			
Classe granulaire	0/5	0/5	3/8	8/15
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1586	-	1390	1342
Taux d'absorption d'eau (%)	0.8	0	3.5	2,92
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	2,75	2,69	2,64
Module de finesse	2,44	2,16	*	*
Équivalent de sable (%)	81	*	*	*
LA (%)	*	*	23	25
TCLP de verre broyé (mg/l)	*	158,7	*	*
TCLP verre traité (mg/l)	*	1,21	*	*

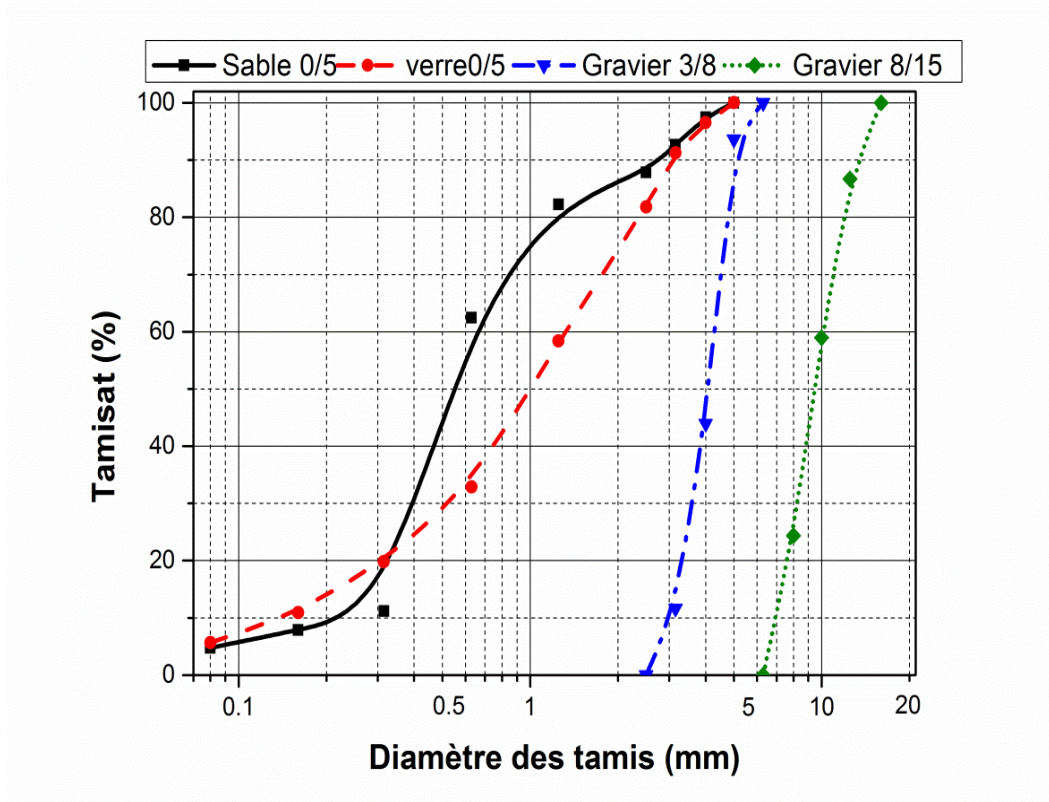


Figure II.3: Analyse granulométrique des granulats utilisée.

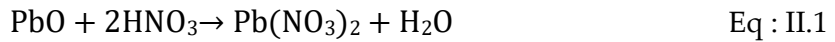
### II.2.5. Superplastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom suivant : Medaflow 30. C'est un liquide de couleur jaunâtre, de pH de 6 et de densité de 1,07. L'extrait sec de cet adjuvant représente 30% de sa masse. sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment [163],

### II.2.6. Granulats fins issus par des déchets du verre TRC

Le verre TRC broyé est obtenu à partir d'un concassage à l'aide d'un concasseur à mâchoires qui nous a permis d'obtenir un matériau dont les grains sont des dimensions 0-5 mm (Figure II.4). Puis, le verre TRC broyé a été traité par immersion dans une solution d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) avec une concentration de 5%, pendant une période de 3 heures [112]. Après cette période l'oxyde de plomb ( $\text{PbO}$ ) a été dissous dans la solution d'acide

nitrique (HNO<sub>3</sub>) pour former du nitrate de plomb soluble (Pb (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) par la réaction chimique suivante :



Les procédures de traitement sont représentées dans la figure. II.4 Les propriétés physiques et l'analyse de lixiviation par toxicité du verre TRC sont présentées dans le tableau II.2.

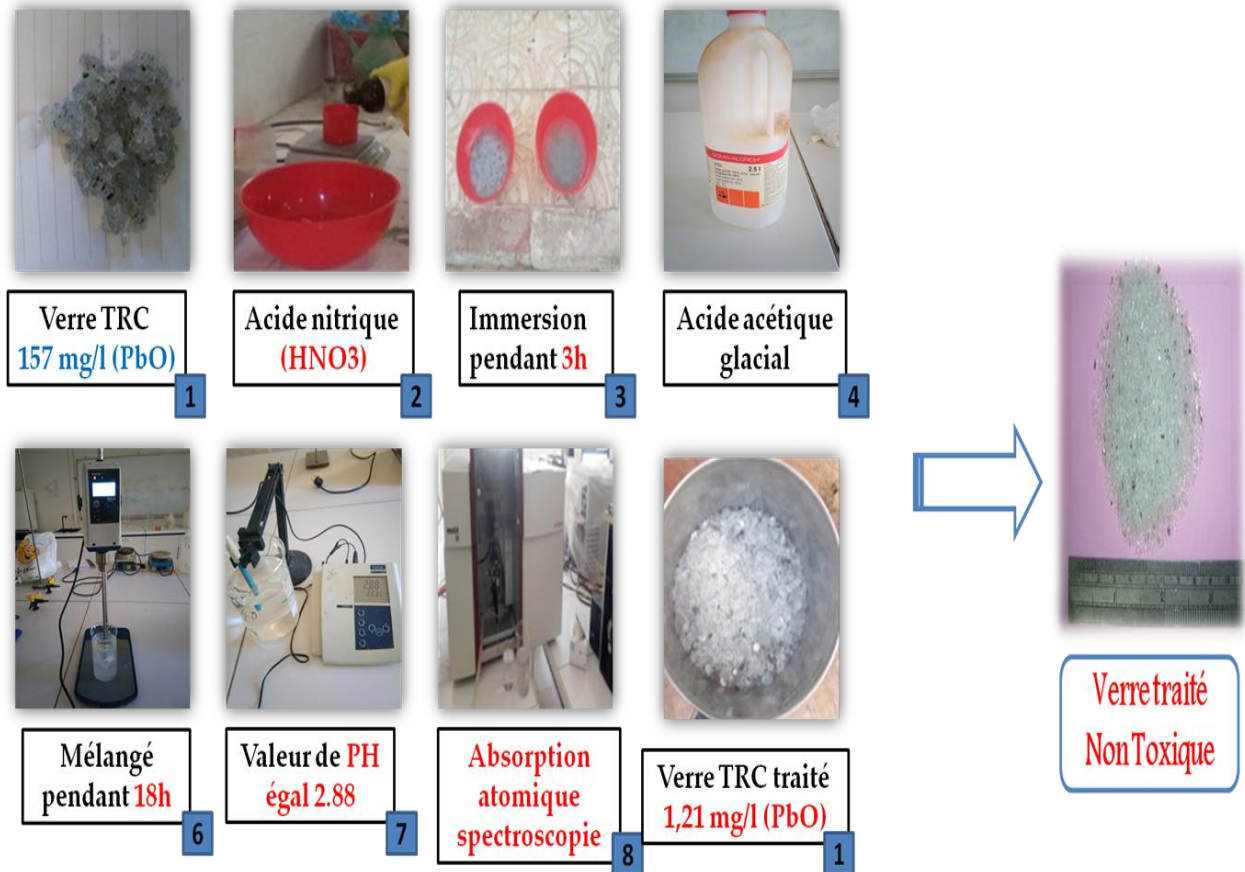


Figure II.4: Les procédures de traitement verre TRC.

### II.3. FORMULATION

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire de chaque matériau du mélange, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant (E/L). Lors de la formulation, la caractérisation du BAP est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir des tests mis en place depuis son développement. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition,

mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. La formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports (E/L), le rapport Sable/Mortier (S/M), le dosage en SP, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons. Les principaux tests réalisés destinés à caractériser le BAP avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité, l'absence de blocage et sa stabilité [146, 147].

Dans notre étude nous nous étions fixés comme but essentiel l'influence de MK comme ajout cimentaire et le verre TRC comme granulats fin sur les caractéristiques et performances du BAP. Pour cela, on a fixé tous les autres paramètres, à savoir la quantité de sable dans le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport (E/L) et on varie seulement le pourcentage en SP par rapport au poudre pour obtenir un BAP selon les propriétés désirées.

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais Okamura et appelée la méthode générale, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport E/C ainsi que le rapport superplastifiant/Liant (SP/L). Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode Okamura a été maintenue [154, 157, 161, 191].

### II.3.1. Formulation du MAP

Pour la formulation du BAP, 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. Le béton et son mortier correspondant présentent les mêmes propriétés rhéologiques, tels qu'un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante, afin d'assurer une bonne résistance à la ségrégation du béton durant l'écoulement. Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de

cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. 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  $270 \text{ mm} \leq D \leq 330 \text{ mm}$ , et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre  $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$  [143] . Les différents composants des MAP sont présentés dans le tableau II.3.

*Tableau II.3. Composition des différentes MAP étudiés dans un  $1 \text{ m}^3$*

Mélange	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	MK (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (Kg/m <sup>3</sup> )	TRCG (Kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)
Témoin	675,44	0	1325	0	0,8
5MK+0GV	641,67	33,77	1325	0	0,85
5MK+10 GV	641,67	33,77	1192,5	132,5	0,85
5MK+20 GV	641,67	33,77	1060	265	0,85
5MK+30 GV	641,67	33,77	927,5	397,5	0,83
5MK+40 GV	641,67	33,77	795	530	0,83
5MK+50 GV	641,67	33,77	662,5	662,5	0,8
10MK+0 GV	607,9	67,54	1325	0	1,1
10MK+10 GV	607,9	67,54	1192,5	132,5	1,1
10MK+20 GV	607,9	67,54	1060	265	1,1
10MK+30 GV	607,9	67,54	927,5	397,5	1,05
10MK+40 GV	607,9	67,54	795	530	1
10MK+50 GV	607,9	67,54	662,5	662,5	0,95
15MK+0 GV	574,12	101,32	1325	0	1,2
15MK+10 GV	574,12	101,32	1192,5	132,5	1,2
15MK+20 GV	574,12	101,32	1060	265	1,2
15MK+30 GV	574,12	101,32	927,5	397,5	1,15
15MK+40 GV	574,12	101,32	795	530	1,15
15MK+50 GV	574,12	101,32	662,5	662,5	1,1

### II.3.2. Formulation du BAP

La formulation des BAP est une étape délicate nécessitant de trouver une composition entre différentes caractéristiques a priori contradictoires. Un BAP doit avoir une grande fluidité lui permettant d'avoir comme seul moteur d'écoulement la pesanteur sans présenter des risques de ségrégation (statique ou dynamique) ou d'instabilité et sans pour autant entraîner une diminution des résistances mécaniques.

Par conséquent, les BAP doivent satisfaire à trois conditions primordiales : la fluidité, l'homogénéité et la robustesse. Au cours de notre étude, nous avons choisi trois essais pertinents qui permettent de quantifier :

- La mobilité en milieu non confiné,
- La mobilité en milieu confiné,
- La stabilité.

Comme le MAP occupe un volume important dans le mélange du BAP, les résultats des essais sur MAP seront pris en considération. Sur la base des résultats des essais de MAP on procède la formulation du BAP, avec un volume de gravillon du béton égale à 50% par rapport au volume du solide, le pourcentage des gravillons (G3/8 et 8/15) et de (40% et 60%) respectivement. Si les résultats ne sont pas adéquats selon la recommandation le rapport SP/L sera ajusté afin d'obtenir aux résultats adéquats pour un bon BAP sans ségrégation ni ressuage.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale.

Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP. Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du superplastifiant dans le concept du BAP [163, 164, 167]. Le tableau II.4 présente les différentes compositions des BAP confectionnés lors de la

deuxième étape de cette étude. Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe A.

*Tableau II.4. Composition des différentes BAP étudié dans un 1 m<sup>3</sup>*

Mélange	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	MK (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	GV (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier (Kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)
<i>Témoin</i>	469,59	0	909.78	0	823,24	0,8
5MK+0GV	446,11	18,68	909.78	0	823,24	0,85
5MK+10 GV	446,11	18,68	819	90,978	823,24	0,85
5MK+20 GV	446,11	18,68	727.82	181,956	823,24	0,85
5MK+30 GV	446,11	18,68	636.85	272,934	823,24	0,83
5MK+40 GV	446,11	18,68	545.87	363,912	823,24	0,83
5MK+50 GV	446,11	18,68	454.89	454,89	823,24	0,8
10MK+0 GV	422,63	37,35	909.78	0	823,24	1,1
10MK+10 GV	422,63	37,35	819	90,978	823,24	1,1
10MK+20 GV	422,63	37,35	727.82	181,956	823,24	1,1
10MK+30 GV	422,63	37,35	636.85	272,934	823,24	1,05
10MK+40 GV	422,63	37,35	545.87	363,912	823,24	1
10MK+50 GV	422,63	37,35	454.89	454,89	823.24	0.95
15MK+0 GV	399,15	56,03	909.78	0	823,24	1,2
15MK+10 GV	399,15	56,03	819	90,978	823,24	1,2
15MK+20 GV	399,15	56,03	727.82	181,956	823,24	1,2
15MK+30 GV	399,15	56,03	636.85	272,934	823,24	1,15
15MK+40 GV	399,15	56,03	545.87	363,912	823,24	1,15
15MK+50 GV	399,15	56,03	454.89	454,89	823,24	1,1

### II.4. PROCEDURE DE MALAXAGE

#### II.4.1. MAP

Plusieurs auteurs décrivent la méthode de malaxage dans le but de couvrir la surface de tous les granulats par la pâte de ciment et d'assurer le mélange le plus homogène possible des différents constituants. Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [192] qui s'articule sur les étapes suivantes :

- 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 = 60% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 40% Eau) mélangé avec le superplastifiant ;
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

#### II.4.2. BAP

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à un béton performant et durable. Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres. Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences. Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la figure. II.5, elle suit les étapes suivantes :

- Malaxer le sable, ciment et gravier (3/8 et 8/15) pendant 1 minute pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- Malaxer le mélange pendant 5 minutes;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Malaxer pendant 30 secondes.
- Vérification visuelle de ressuage .

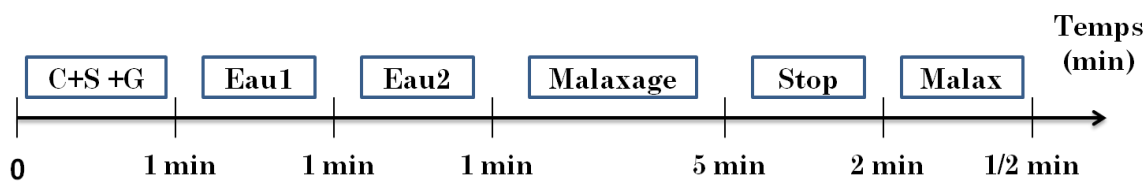


Figure II.5: Séquence de malaxage du BAP.

## II.5. ESSAIS SUR MAP À L'ETAT FRAIS

### II.5.1. Essais au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste ont été réalisés à l'aide d'un mini-cône. Le cône est placé 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 moyen ( $D_{\text{moy}}$ ) correspond à la moyenne de deux mesures perpendiculaires ( $D1$  et  $D2$ ) (Figure II.6).

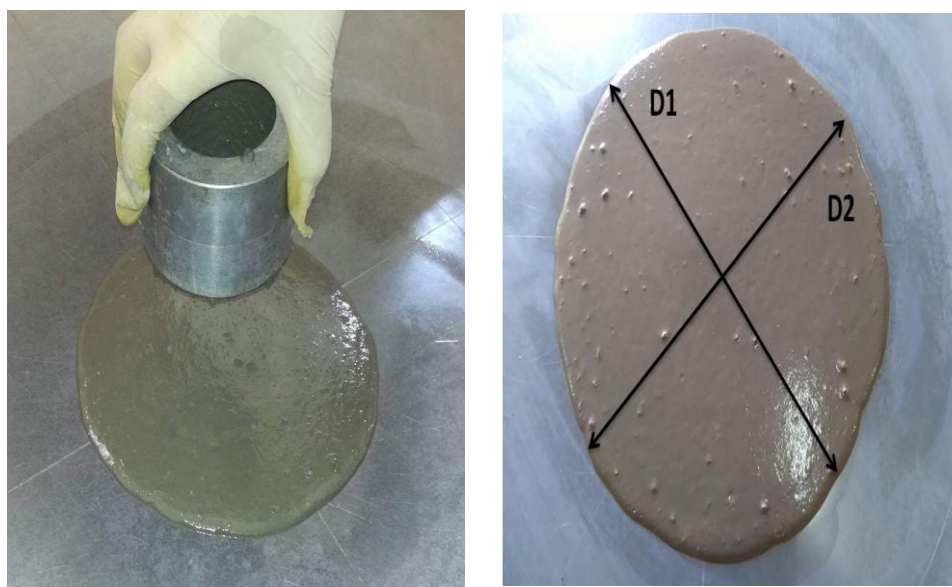


Figure II.6: Description de Mélange témoin.

### II.5.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

La méthode 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  $T_v$  est le temps qui sépare l'instant de l'ouverture du clapet et l'instant où la lumière du jour devient visible du haut du mini-entonnoir.

### II.5.3. Essais au rhéomètre

Le rhéomètre est un instrument permettant de mesurer la pression nécessaire pour initier le mouvement d'un fluide (seuil de cisaillement ou SC), et la résistance à l'écoulement au sein d'un fluide (viscosité plastique ou VP), ces deux paramètres caractérisent le comportement rhéologique d'un béton. Afin d'étudier le comportement rhéologique des MAP, on a utilisé un Agitateur mécanique de marque Heidolph- RZR 2102 Control Z (voir annexe D). L'appareil est équipé d'un agitateur, piloté par un logiciel appelé «Hei-Control » et d'un récipient, de 30 cm de diamètre qui contient des baguettes parallèlement à leur axe (Figure II.7). Ces baguettes permettent de réduire le risque de glissement du matériau étudié. Le rayon interne mesure 5.25 cm et le rayon externe 15 cm.

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essais qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [193]. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Chaque minute, le logiciel de pilotage de l'agitateur enregistre le couple de rotation (M) correspondant à la vitesse de rotation ( $\Omega$ ) imposée. Les résultats bruts se présentent sous la forme d'une fonction linéaire liant le couple et la vitesse de rotation (Figure II.8).

$$M = M_{\text{vide}} \times k\Omega \quad \text{Eq : II.2}$$

Où

M (N.m) est le couple total appliqué sur le mortier,  $M_{\text{vide}}$  (N.m) est le couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur), k (N.m.s) est un coefficient de proportionnalité,  $\Omega$  (rad/s) est la vitesse de rotation de la pale.

Les mesures sont réalisées avec le profil de vitesse défini dans la figure II.8, en suivant les étapes suivantes :



*Figure II.7: Rhéomètre utilisé et son système d'acquisition.*

**1ère étape** : mesure des couples à vide ( $M_{\text{vide}}$ ). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.

**2ème étape** : remplissage du mortier dans le récipient. Il s'effectue en une seule couche sans compactage.

**3ème étape** : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient), puis plongée au milieu du mortier jusqu'à l'arase du mortier.

**4ème étape** : mesure des couples totaux ( $M_{\text{total}}$ ). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli.

**5ème étape** : calculs des couples finaux ( $M$ ). Les couples finaux s'obtiennent par le calcul de la différence entre les couples totaux et les couples à vide pour chaque palier de vitesse (Eq : II.2).

$$M = M_{\text{total}} - M_{\text{vide}} \quad (\text{Eq : II.3})$$

**6ème étape** : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques qui s'effectue comme suivant :

Le résultat brut obtenu suite à l'essai rhéologique est lissé afin de limiter la propagation des erreurs de mesures. Compte tenu de la physique du problème, la loi de lissage est

linéaire . Cette équation permet d’obtenir les couples finaux en fonction de chaque palier de vitesse ( $M_i - \Omega_i$ ).

L’exploitation des mesures rhéologiques consiste à tracer la courbe d’évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) à partir des couples ( $M_i - \Omega_i$ ) mesurés. Cela permet, en assimilant le comportement rhéologique du mortier adopté. Dans ce travail le comportement rhéologique est celui du Bingham (Eq : II.4).

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad \text{Eq : II.4}$$

Où  $\tau$  (Pa) est la contrainte de cisaillement,

$\tau_0$  (Pa) est le seuil de cisaillement,  $\mu$  (Pa.s) est la viscosité plastique,

( $s^{-1}$ ) est le taux de cisaillement.

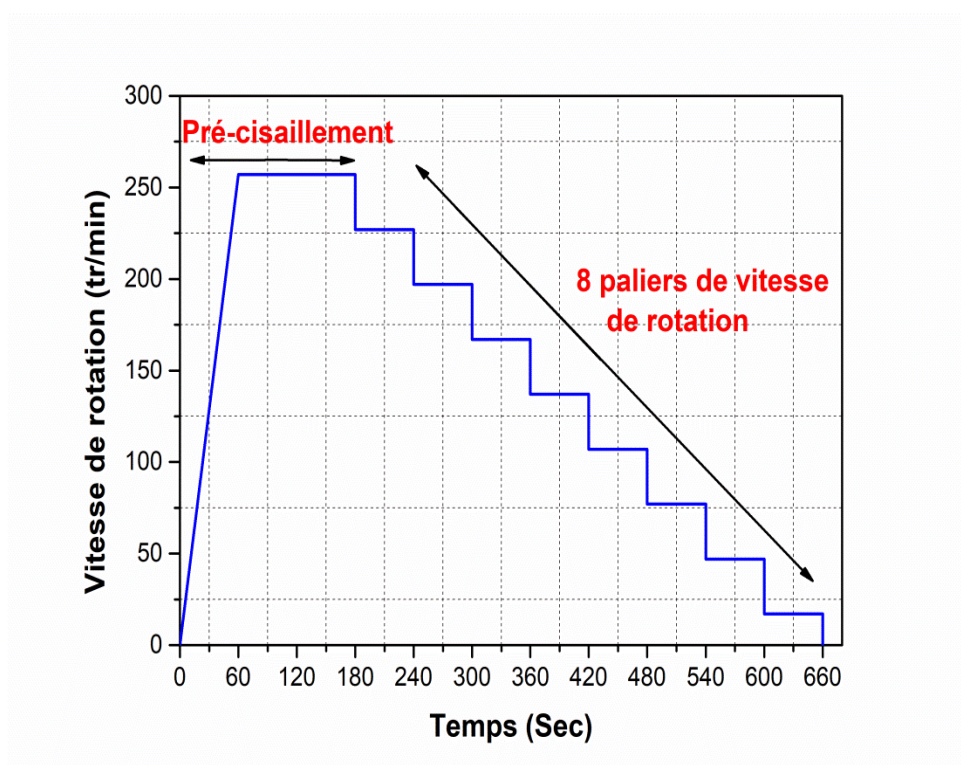


Figure II.8: Profil de vitesse [193].

### II.6. ESSAIS SUR MAP A L'ETATS DURCI

#### II.6.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme EN 12390-3 [194] par compression axiale sur six demi-prismes de trois éprouvettes prismatiques qui ont été préalablement écrasées par flexion à 3, 7, 28 et 90 jours.

#### II.6.2. Retrait

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16cm) conformément à la norme NF P15-433 [195] est conditionnée l'air libre. Ces éprouvettes placées dans un réfractomètre munis d'un comparateur qui nous permet la mesurer du retrait à tout moment à court, moyen et long terme (du 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 et 90 jours).

Après 24 h de la confection des éprouvettes au moment de démoulage la variation de longueur au temps t sera :

#### II.6.3. Résistance à haute température

Après 90 jours de durcissement dans l'eau, six échantillons prismatiques (demi-prismes obtenus après le test de flexion de trois spécimens de 4 × 4 × 16 cm) ont été sélectionnés pour évaluer la résistance au feu, 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 600°C, 800°C et 1000°C et avec une vitesse de chauffage égale à 5 °C /min pour atteindre des températures constantes dans le four pendant deux heures. Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont ensuite refroidis à l'air pendant 24 heures [196].

Pour chaque température, des mesures de pertes ont été évaluées par la relation suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Eq : II.5}$$

Où

$M_1, M_2$  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 suivante:

$$\text{RCR}(\%) = \frac{\text{RC}_2}{\text{RC}_1} \times 100 \quad \text{Eq : II.6}$$

Où

RCR (%) résistance à la compression résiduelle,

$\text{RC}_1$  (MPa) est la résistance à la compression résiduelle du mortier après chauffage,

$\text{RC}_2$  (MPa) est la résistance à la compression initiale du mortier après 90 jours de cure.

### II.6.4. Réaction alcalis-silice

Les mesures de la réaction alcali-silice (RAS) accélérée ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (2.5x2.5x28 cm) conformément à la norme ASTM C 1260 [197]. Les échantillons sont ensuite placés dans l'eau distillée à 80°C pendant  $24 \pm 2$  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,

### II.6.5. Absorption d'eau par immersion totale

Cet essai est réalisé en conformité avec la norme ASTM C642-97 [198]. La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à  $105 \pm 50^\circ\text{C}$  pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit  $M_1$ .

Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à 21°C pendant 72 heures. Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, sont pesées de nouveau soit  $M_2$ . Le taux d'absorption est calculé comme suit :

$$\text{Ab}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Eq : II.7}$$

Où

Ab : le taux d'absorption en % ;

M<sub>1</sub> : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;

M<sub>2</sub> : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg.

### II.7. ESSAIS SUR BAP A L'ETAT FRAIS

#### II.7.1. Essais d'étalement et T<sub>50</sub>

Cet essai consiste à déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son propre poids en faisant face aux forces de friction. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité du BAP. L'étalement et le temps d'écoulement T<sub>50</sub> peuvent être classés selon la norme européenne (EN 12350-8) [199]. Après avoir humidifié la surface de la plaque grâce un chiffon pour éliminer l'eau en excès, on place le cône sur le centre de la plaque et on équipe la partie supérieure du cône d'un entonnoir avant de prélever un échantillon correspondant au béton représentatif. Par la suite on soulève le cône verticalement d'une manière minutieuse (à l'aide des deux poignées), et on lance le chronomètre dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle de 50 cm gradué sur la plaque, cette mesure c'est le T<sub>50</sub>.

Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque, on mesure le diamètre final (D<sub>1</sub> et D<sub>2</sub>) sur deux côtés perpendiculaires, et on détecte visuellement s'il y a des signes de ségrégation de béton (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier). Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues.

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

La viscosité apparente caractérisée par le V-funnel peut être classé selon la norme européenne EN 12350-9 [200] , cet essai permet d'estimer le temps de vidange de béton sous son propre poids. Le temps mesuré indique la fluidité et la capacité de béton a passé dans des orifices qui sont petites (capacité de passage / blocage). Après avoir placé le V-funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé, nous avons prélevé

dans un seau un échantillon de béton représentatif d'environ de 12 litres pour remplir l'entonnoir avec le béton, et puis nous avons mis de seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir avec l'ouverture de clapet. Après cette opération, nous avons rempli l'entonnoir pour une deuxième fois de béton et nous avons mis le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir. Après une attente de 10 secondes, nous avons ouvert le clapet en lançant le chronomètre et quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, nous avons arrêté le chronomètre, cette mesure est l'équivalent de temps d'écoulement.

### II.7.3. Essai de La Boîte En L (L-Box)

L'aptitude à l'écoulement dans la boîte en L peut être classée selon la norme européenne EN 12350-10 [201], cet essai est réalisé en utilisant une boîte ayant une forme en L. Elle permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. 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 ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage  $H_2/H_1$ . Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille. C'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Il est également possible d'exprimer le résultat de l'essai par la seule valeur de  $H_1$ . Cette mesure est plus précise que le rapport  $H_2/H_1$ , mais son utilisation est moins répandue.

### II.7.4. Essai de stabilité au tamis

L'essai de ségrégation au tamis vise à qualifier la résistance du BAP à la ségrégation dynamique en mesurant l'indice de ségrégation (IS) qui est le rapport de la quantité de laitance sur la masse de l'échantillon. Dans cet essai, avant de peser le tamis + fond sur la balance et faire la tare il faut qu'on pèse le fond seul, et le tamis à vide afin de peser. Juste

après 15 mn on verse au centre du tamis un poids de béton égal à 4.8 kg (tolérance  $\pm 0.2$  kg) avec une hauteur de chute de 50 cm  $\pm 5$  cm [202]. On note le poids de l'échantillon, et après 2 min d'attente, on calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon selon l'équation sous dessous:

$$IS (\%) = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \times 100 \quad \text{Eq : II.8}$$

### II.8. ESSAIS SUR BAP A L'ETATS DURCI

#### II.8.1. Résistance mécanique

La résistance à la compression et la traction a été mesurée à 7, 28 et 90 sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm) conformément à la norme européenne EN 196-1 [203]. L'essai de compression se fait, dans notre cas, sur six morceaux de trois éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) qui ont été préalablement écrasées par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 2000KN.

#### II.8.2. Essai de Vitesse d'auscultation sonique (VAS)

La mesure de la vitesse de propagation d'ondes se fait moyennant un appareil d'auscultation sonique (ultrason), et conformément à la norme ASTM C597-16 [204]. L'appareil génère des impulsions électriques traversant l'échantillon du béton à partir d'un transducteur émetteur appliqué sur une surface plane.



*Figure II.9: Mesure de la vitesse d'auscultation sonique.*

L'impulsion est captée par un transducteur récepteur également appliqué sur une surface plane en opposition et parallèle au premier (Figure II.9).

Notons ici que ces surfaces doivent être préalablement lubrifiées par de la vaseline pour assurer une meilleure transmission des impulsions. Lorsque l'impulsion est captée par le récepteur, l'instrument affiche le temps de propagation. Connaissant la distance  $d$  entre les deux transducteurs, la VAS est donnée par la formule suivante :

### II.8.3. Essai de ségrégation statique

L'essai consiste à couper longitudinalement des éprouvettes cylindriques ( $16 \times 32 \text{ cm}^2$ ) en deux morceaux, et à examiner par la suite la ségrégation statique en observant la répartition des gros granulats le long des faces planes des morceaux. Une accumulation des gros granulats est le signe d'une ségrégation statique. La découpe des éprouvettes se fait moyennant un scié électrique.

### II.8.4. Essai de Porosité

En terme de porosité, trois disques de  $100 \times 50 \text{ mm}$  coupés dans des éprouvettes cylindriques de diamètre  $100 \text{ mm}$  et de hauteur  $200 \text{ mm}$  ont été sélectionnés pour évaluer la porosité accessible à l'eau après 90 jours selon la norme NF P18-459 [205].

L'échantillon est passé ensuite à imbibition sous vide, et après saturation une pesée sous eau ( $M_{\text{eau}}$ ) et une autre dans l'air ( $M_{\text{air}}$ ), par la suite l'échantillon est séché dans une étuve ventilée à  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  jusqu'à poids constant c'est la masse sec ( $M_{\text{sec}}$ ) (Figure II.10). Le calcul de porosité est exprimé par l'équation suivante:

$$\text{Porosité (\%)} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \times 100 \quad \text{Eq : II.9}$$

Où

$M_{\text{air}}$ ,  $M_{\text{sec}}$  et  $M_{\text{eau}}$  : sont les masses d'éprouvette imbibée pesée dans l'air, sèche et dans l'eau.



Figure II.10: Essai de porosité.

### II.8.5. Essai de Perméabilité à gaz

La perméabilité à gaz est l'un des moyens généralement utilisés pour caractériser la structure poreuse du béton. Le test de perméabilité à l'azote a été réalisé selon la méthode CEMBUREAU selon NF XP P18-463 [206]. Les échantillons utilisés pour obtenir la perméabilité aux gaz étaient cylindriques, d'un diamètre de 15 cm et d'une hauteur de 5 cm, puis protégés et confinés latéralement, ce qui garantit un transfert unidirectionnel du gaz (Figure II.11). La perméabilité apparente  $K_{app}$  a été mesurée en appliquant les pressions relatives des gradients de 1 bar et calculée selon l'équation:

$$K_{app} = \frac{2.P_i.Q.L.\mu}{A(P_i^2 - P_0^2)} \quad \text{Eq : II.10}$$

Où

L: L'épaisseur de l'éprouvette);

À: L'aire de la section transversale de l'échantillon;

Q: Le flux de gaz.

$\mu$ : est le coefficient de viscosité dynamique de l'azote gazeux ( $17,5 \times 10^{-6}$  Pa.s);

$P_i$ ,  $P_0$ : est la pression d'entrée et atmosphérique respectivement.

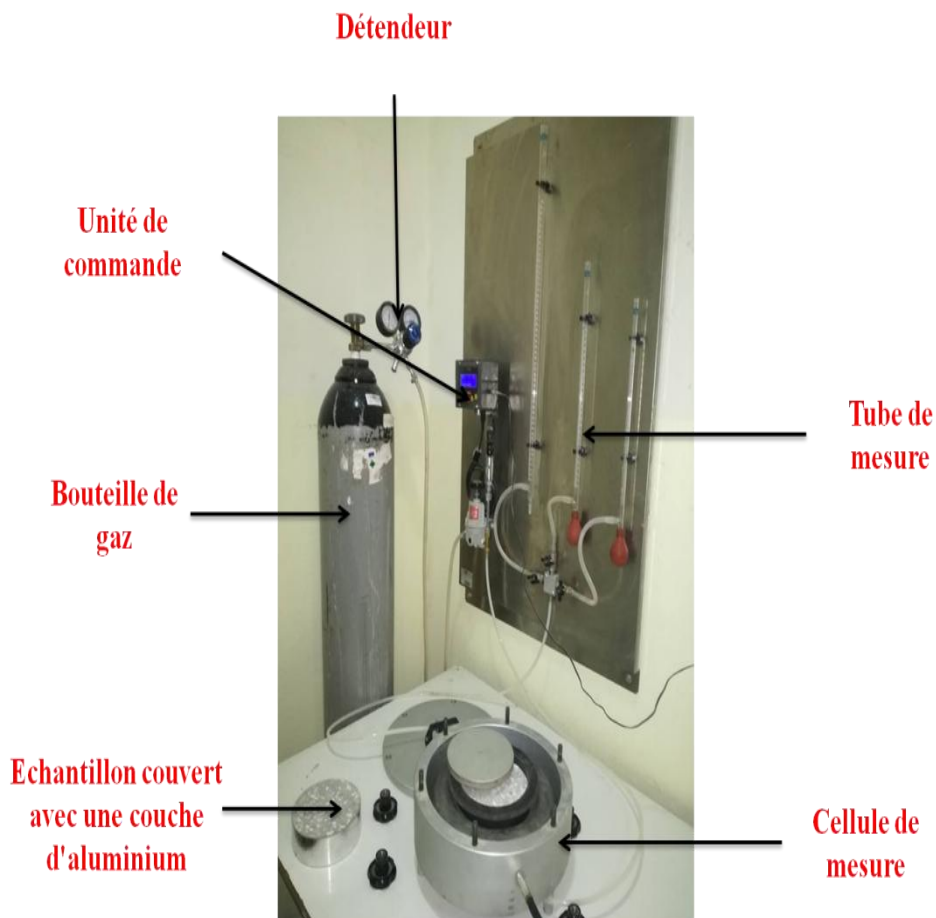


Figure II.11: Essai de perméabilité à gaz.

Le tableau II.5 présente la classification de l'évaluation de la performance du béton en fonction de la perméabilité aux gaz.

Tableau II.5. Classification du béton selon la perméabilité aux gaz [206]

K app [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Qualité du béton
<0.1	Excellent
0.1–0.5	Très bien
0.5–2.5	Moyen
2.5–12.5	Faible
>12.5	Très faible

### II.8.6. Essai de Perméabilité aux ions chlorure

La perméabilité aux ions chlorure a été déterminée selon la norme ASTM C-1202 [207]. L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendrée par une différence de potentiels égale de 60 Volts maintenue constante pendant 6 heures au moyen d'électrodes en acier inoxydable entre les deux cellules à deux compartiments. L'une des faces de l'éprouvette est au contact d'une solution de NaCl dosée à 30 g/l (compartiment amont : cathode) et l'autre face est au contact d'une solution de NaOH 0.3N (compartiment aval : anode). Les électrodes immergées dans chaque compartiment sont constituées par un grillage métallique. Les spécimens cylindriques de diamètre de 10 cm et d'épaisseur de 5 cm sont obtenus en découpant des éprouvettes de 10 cm × 20 cm à l'aide de scie de béton. Avant chaque essai, les éprouvettes sont soumises à une saturation d'eau après avoir été vidées de toute l'aire à l'intérieur des éprouvettes à l'aide d'une pompe à vide. La figure II.12 représentés l'essai perméabilité aux ions chlorure.

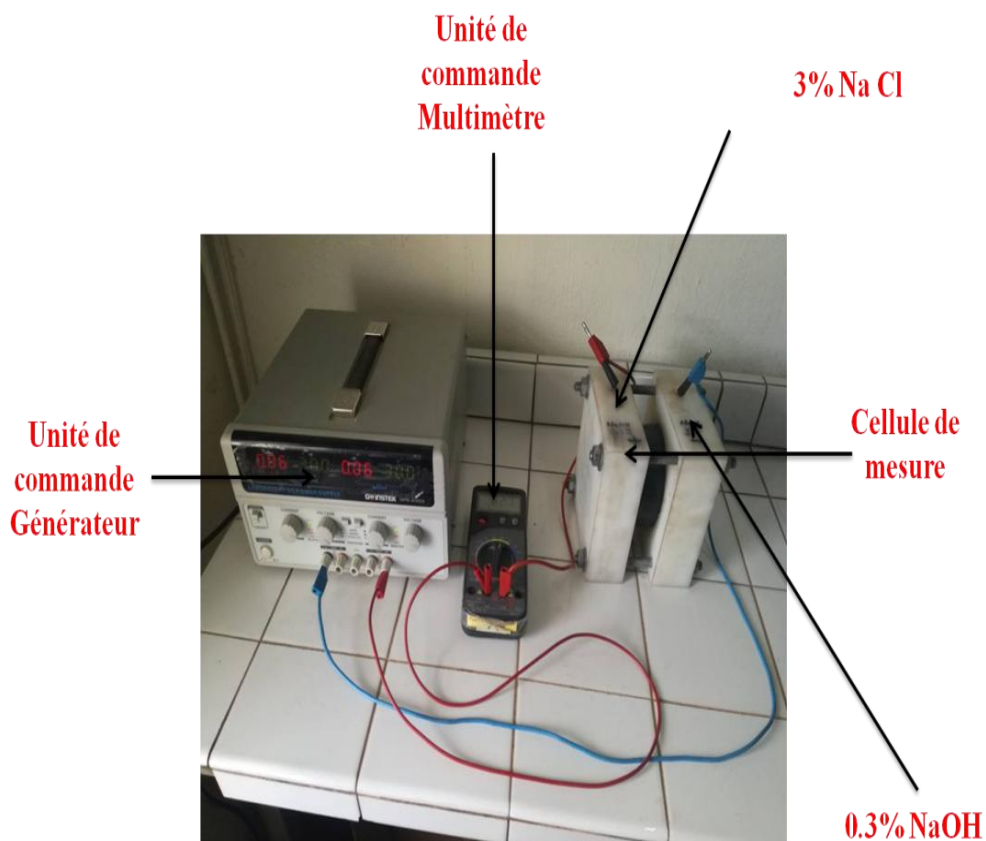


Figure II.12: Essai de perméabilité aux ions chlorure.

Le tableau II.6 présente la classification de l'évaluation de la performance du béton en fonction de la perméabilité aux ions chlorure.

*Tableau II.6. Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure*

Charge totale passée	Qualité du béton
>4000	Élevé
2000–4000	Modérée
1000–2000	Faible
100–1000	Très faible
<100	Négligible

### **II.8.7. Essais d'analyse par microscope électronique à balayage (MEB)**

Après 90 jours de conservation et pour comprendre les micro-structures de certains mélanges durcis, des analyses de microscopie électronique à balayage (MEB) sont réalisées en utilisant VEGA3 - SEM TESCAN avec une tension d'accélération de 25 kV.

### II.9. SYNTHÈSE

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché algérien pour la préparation des MAP et BAP. Notre principal objectif est l'étude de l'effet combiné de metakolin comme ajout cimentaire et les déchets de granulats de verre comme granulats fin sur les performances rhéologiques, mécaniques et la durabilité des MAP et BAP. Afin d'atteindre ce but, on a procédé à la substitution du ciment par le MK et la substitution du sable par les granulats de verre traité. Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- La méthode de formulation utilisée, cette méthode appelée méthode générale ou méthode d'Okamura. L'objectif de cette méthode est d'optimiser les dosages en superplastifiant et en sable à l'échelle du mortier avant de passer à l'échelle du béton ;
- Pour formuler le BAP, des essais préliminaires ont été effectués sur le MAP pour déterminer la teneur en sable et le dosage en superplastifiant;
- Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur pour déterminer leurs caractéristiques rhéologiques ; à travers l'essai d'étalement, l'essai d'écoulement au - entonnoir en V, l'essai de stabilité aux tamis et l'essai au rhéomètre ;
- À l'état durci, des essais sont menés pour examiner l'influence combinée de metakolin et les granulas de verre sur les résistances à la compression et à la flexion et la vitesse d'auscultation.
- Enfin, des essais de durabilité sont réalisés dans le but d'évaluer les performances de différents mélanges aux propriétés de transfert à travers l'essai de porosité, l'essai de perméabilité à gaz, l'essai des ions chlorures.

## **CHAPITRE III**

# **EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT**

**FRAIS**

## CHAPITRE III

# EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS

### III.1 INTRODUCTION

Afin de mettre en évidence les caractéristiques rhéologiques des mortiers et bétons autoplaçants à base de métakaolin et granulats de verre, notre étude est divisée en deux parties :

- La première étape consiste à effectuer des essais sur mortier afin d'optimiser le rapport sable sur mortier (S/M) et le rapport superplastifiant sur liant (SP/L);
- La deuxième étape est consacrée aux mesures des propriétés rhéologiques à l'échelle des mortiers et bétons autoplaçants. On passera ensuite à la discussion des résultats issus des essais tels que l'étalement, le temps d'écoulement, la ségrégation, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

### III.2. ÉTUDES DES MAP

#### III.2.1. 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. 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). L'optimisation du pourcentage de SP consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer des performances meilleures à l'état durci. Dans cette étude, on a testé quatre compositions contenant quatre pourcentages de SP, et on a varié le pourcentage du SP de 0.6% à 0.9 % avec un pas de 0.1%. On a fixé aussi le rapport S/M=0.45, S/M=0.5 et le rapport E/C=0.40. Les résultats des essais d'étalement au mini-cône et le temps

### CHAPITRE III : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS

d'écoulement au mini-V funnel pour le choix de SP et le S/M optimal sont illustrés dans le tableau III.1.

D'après le tableau ci-dessus, on a constaté que plus on augmente le pourcentage du SP plus la fluidité augmente, pour un dosage de SP de 0.6 % avec un étalement de 220 mm. Une augmentation du dosage de SP de 0.1% mène à une augmentation de 50 mm de diamètre du mortier. Pour un dosage de 0.8% le mortier présente une bonne fluidité avec un étalement de 320 mm. 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. De nombreuses études ont montré la nécessité d'augmenter le volume de sable à 50% dans le mortier, c.-à-d de sélectionner un rapport S/M égal à 0,5 [167, 182, 191].

**Tableau III.1.** Résultats d'étalement sur MAPT pour différents % de SP et S/M

		MAPT formulés			
Mélanges		MAP1	MAP2	MAP3	MAP4
SP %		0,6	0,7	0,8	0,9
S/M		0,45	0,45	0,45	0,45
		0,5	0,5	0,5	0,5
Étalement (mm)	S/M =0.45	200 < 270	265 =270	279> 270	315 > 330
	S/M =0.5	220 < 270	270 =270	320 > 270	330= 330
Temps d'écoulement (s)	S/M =0.45	12 < 10	6.5 < 10	4.7> 2	2 =2.8
	S/M =0.5	8 < 10	4 < 10	2.15 > 2	2 = 2
Observation		Mélange ferme	Mélange homogène	Mélange homogène	Ségrégation + ressuage

En ce qui concerne le contrôle visuel, les constatations montrent que les deux mélanges MAP2 et MAP3 sont fluides et homogènes, tandis que le mélange MAP4 présente un signe de ressuage, traduit par une couche de laitance entourant la galette du mélange. De ce fait, un dosage en SP de 0,8% et un S/M =0.5 donnent un mortier homogène avec un grand étalement sans risque de ressuage ou de ségrégation. Cet essai préliminaire nous a permis de fixer le dosage du SP de 0.8% et un S/M =0.5. Nawa et al [208], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10s produisent un BAP réussi. Quand à Chai [153], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 secs.

### III.2.2. Effet du superplastifiant sur les MAP

#### III.2.2.1. Étalement au mini-cône

L'effet du dosage en SP sur l'étalement des MAP testés est illustré dans les figures III.1, III.2 et III.3. D'après ces figures, les valeurs de l'étalement en fonction du dosage en SP pour tous les mélanges sélectionnés varient entre 300 et 330 mm, et sont acceptables par les recommandations de Domone et Jin [153], tous les MAP examiner représenteront des mélanges sans ségrégation et ressuage.

L'effet du GV sur le dosage de SP, est présenté sur la figure III.1. Selon la figure on trouve que les dosages de SP diminuent avec l'augmentation de GV pour obtenir les mêmes d'étalement sans ségrégation et ressuage. À titre exemple pour le mélange avec 10% de GV, en remarque que le dosage en SP est de 0.7% ce qui réduisait à 0.5% avec 50% de GV. De plus, le dosage de SP égal à 0.55% avec le mélange incluant 50% de GV a été rejeté, car ils ont donné des mélanges ségrégés et ressusés. Cette amélioration est due à la surface lisse, la texture, la faible absorption d'eau et la faible cohésion entre les particules de verre et la pâte de ciment [209]. Des résultats similaires ont été rapportés dans d'autres recherches [121, 210].

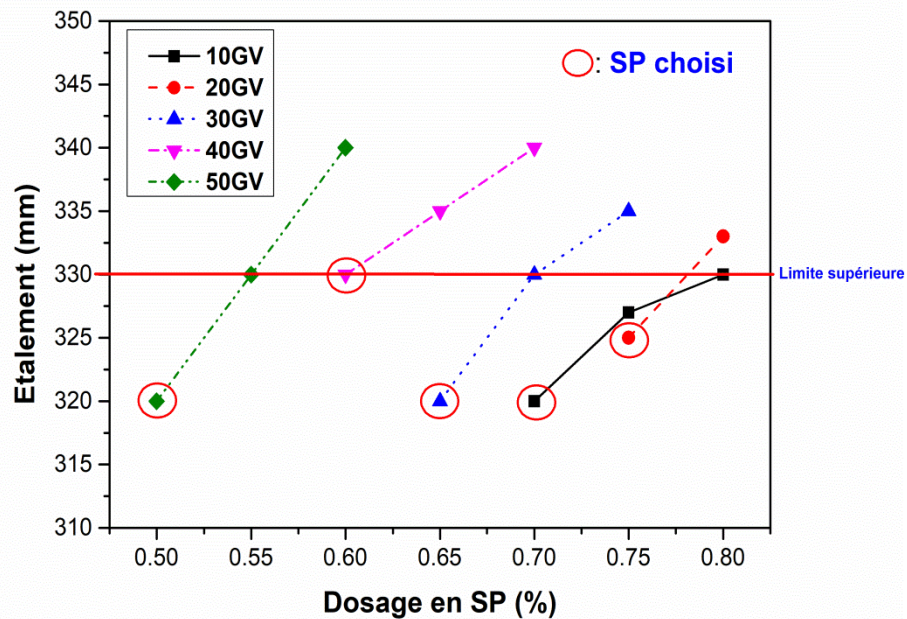


Figure III.1. Étalement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base des granulats de verre.

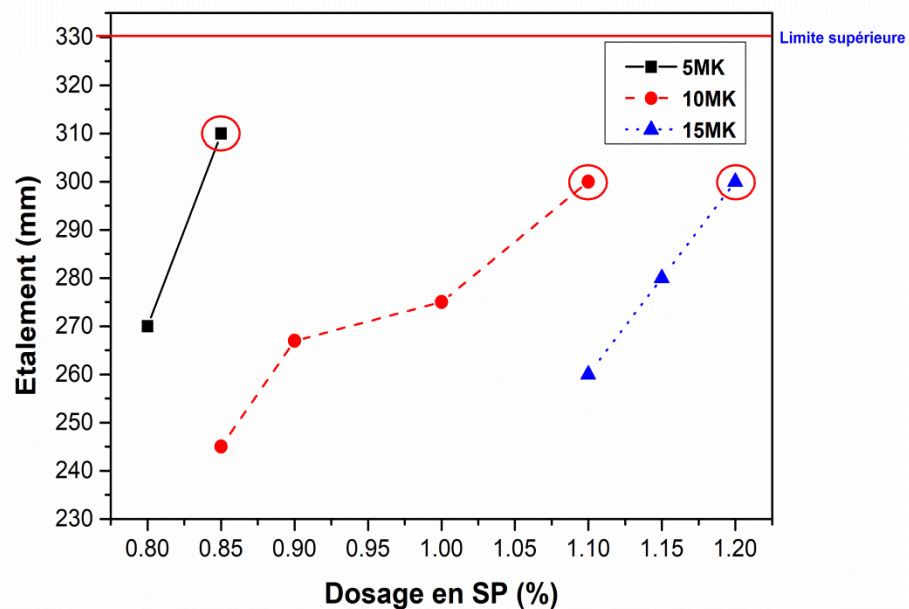


Figure III.2. Étalement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de MK.

Avec l'inclusion de MK, on a constaté une diminution de la fluidité d'après la figure III.2. Donc, il est nécessaire d'augmenter le dosage en SP pour maintenir une fluidité au moins similaire au mélange témoin. La finesse élevée de MK (7000 cm<sup>2</sup>/g) nécessite une quantité supplémentaire de SP pour pouvoir disperser ces particules, ces résultats ont été également rapportés par d'autres chercheurs [211-213]. Un comportement similaire a été observé dans des MAP incluant du MK [66]. Ces résultats montrent que l'augmentation de MK induit une augmentation des dosages en SP. Pour les mélanges élaborés avec la combinaison de MK et GV on a remarqué que la présence de GV dans les mélanges avec MK a également augmenté l'écoulement et a aussi réduit le dosage de SP (Figure III.3), et donne un mortier homogène.

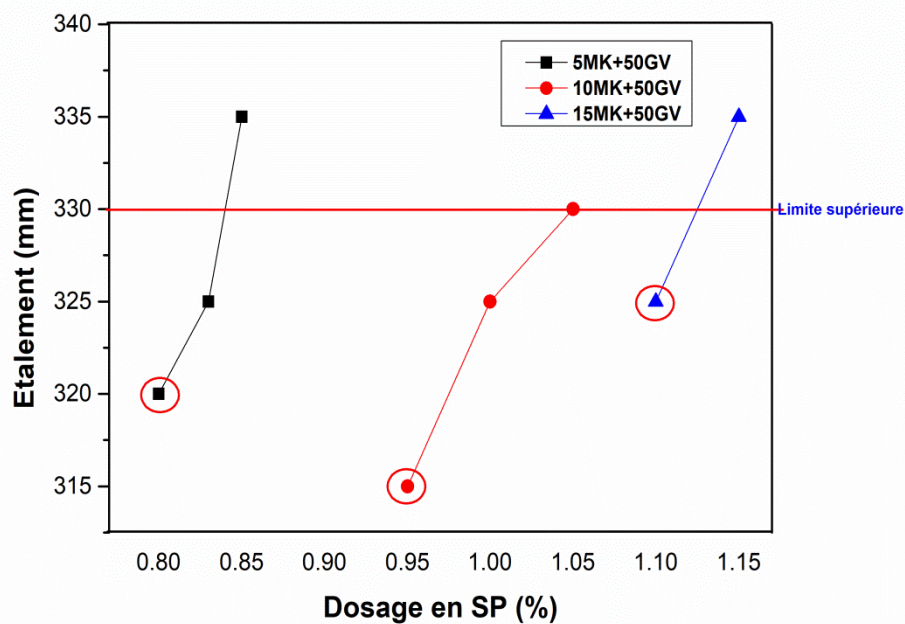


Figure III.3. Étalement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de combinaison de GV et MK.

D'après les résultats obtenus on peut conclure qu'il est possible de réduire le besoin en SP et/ou en eau des MAP confectionnées avec les GV pour obtenir une fluidité comparable au MAPT. Ceci permet de réduire le coût de production, des BAP en diminuant la consommation des sables naturels et en valorisant le déchet de verre.

III.2.2.2. Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V

Les résultats d'écoulement au mini-entonnoir en V pour tous les MAP obtenus sont présentés sur les figures III.4, III.5 et III.6. On constate que le dosage de saturation en SP qui donne des valeurs à l'intérieur de la fourchette recommandée de 2 à 10 secs [153], est de l'ordre de 0.8 jusqu'à 1.2% . La figure III.4 représente l'effet du SP sur le temps d'écoulement de MAP avec le MK. On remarque une augmentation de dosage en SP avec l'augmentation de MK. Les mortiers avec 15% de MK nécessitent un dosage plus élevé de SP, alors que les dosages 0.85 à 1.2% ont donné des temps d'écoulement compris entre 4 et 10 secs. Pour des dosages en SP inférieurs à 1.2%, on remarque que les mortiers sont caractérisés par des temps d'écoulement élevés qui sont hors de l'intervalle de 2 à 10 secondes. L'introduction de GV, a diminué le temps d'écoulement en comparaison avec les MAP avec MK, et diminuée le dosage en SP pour satisfaire le caractère autoplaçant du mortier. Pour des teneurs élevées en GV, les MAP consomment moins de SP que les mélanges composés du ciment et du MK seul. L'introduction de GV dans les mélanges avec le MK surtout avec des teneurs importantes a minimisé l'effet négatif de MK sur le temps d'écoulement et par conséquent la viscosité de mélange (Figure III.5).

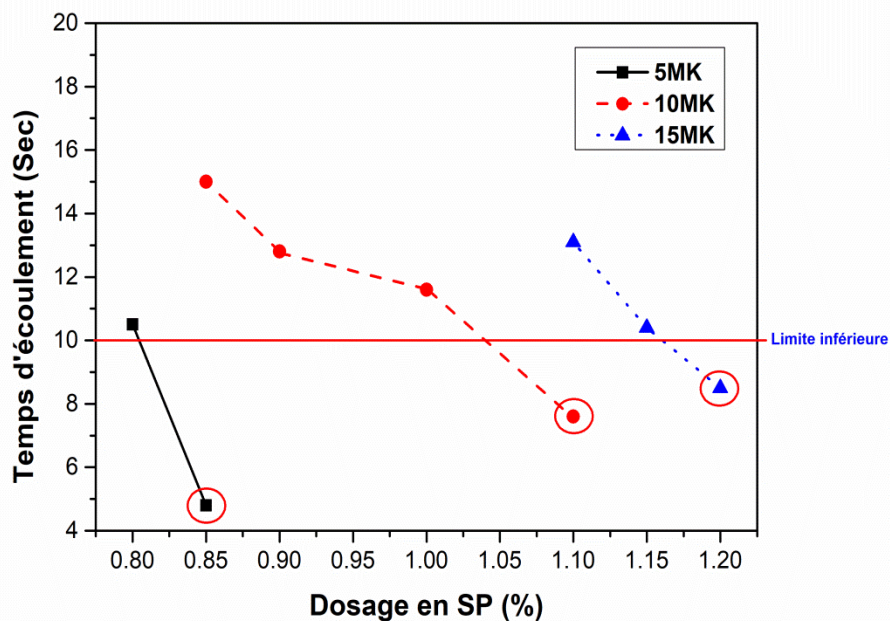


Figure III.4. Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de MK.

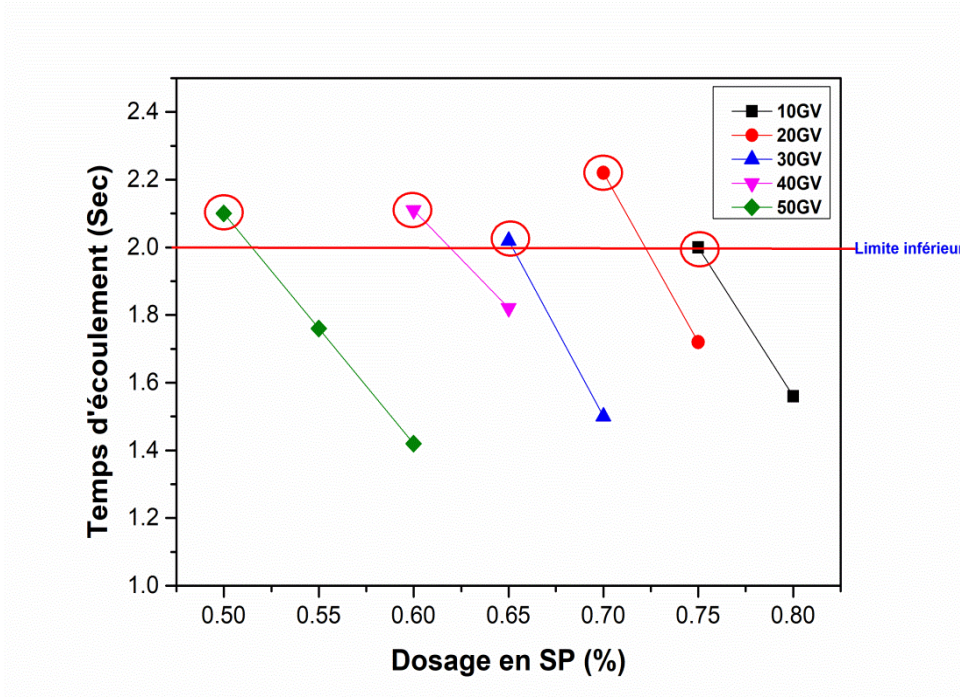


Figure III.5. Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de GV.

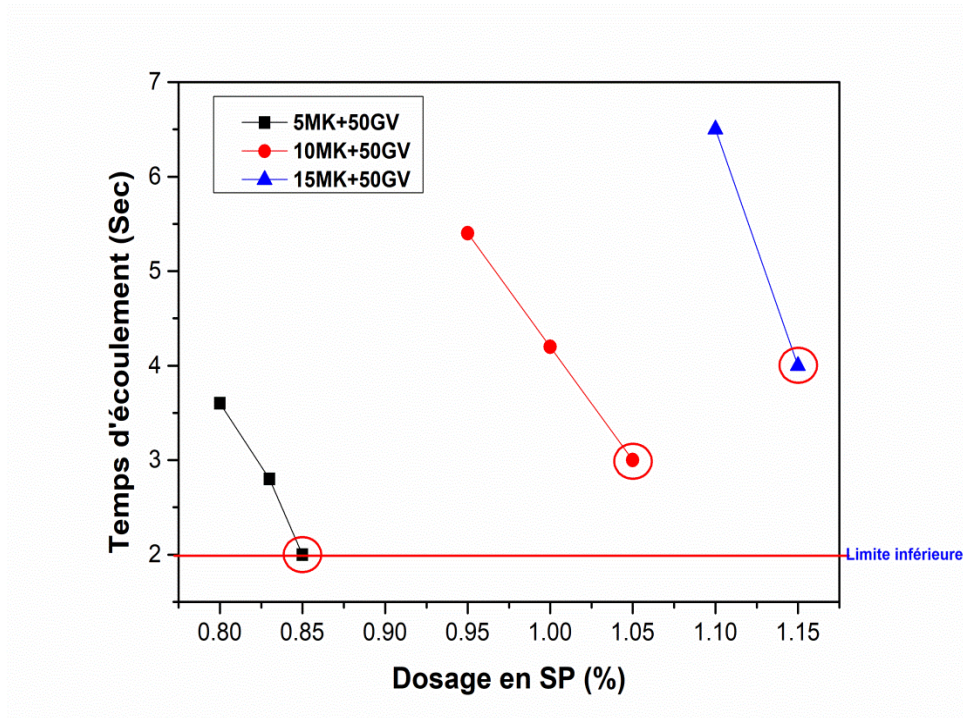


Figure III.6. Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les MAP à base de GV et MK.

En résumé, l'utilisation de MK consomme une part non négligeable du SP selon sa nature et sa finesse, avec un comportement similaire à la fumée de silice, qui se caractérise par une demande en SP supérieure à celle du ciment. La demande en SP de MK et en particulier pour un fort dosage est la plus importante de toutes les MAP. L'introduction de GV a permis de diminuer la demande du dosage en SP dans les mélanges. (Figure III.6).

#### III.2.3. Effet du MK et GV sur les MAP

##### III.2.3.1. Étalement au mini-cône

Les résultats de l'étalement des mortiers en fonction de la teneur en MK et GV, sont représentés sur la figure III.7. La figure montre que les valeurs de l'étalement étaient comprises entre 300 et 330 mm, dans l'intervalle recommandé par Domone et Jin [153]. Elles représenteront donc la capacité d'écoulement du MAP sans ségrégation et ressuage. Cependant, les résultats obtenus montrent une diminution de l'étalement avec l'accroissement de taux de substitution de 10 à 15% dans les mélanges contenant le MK.

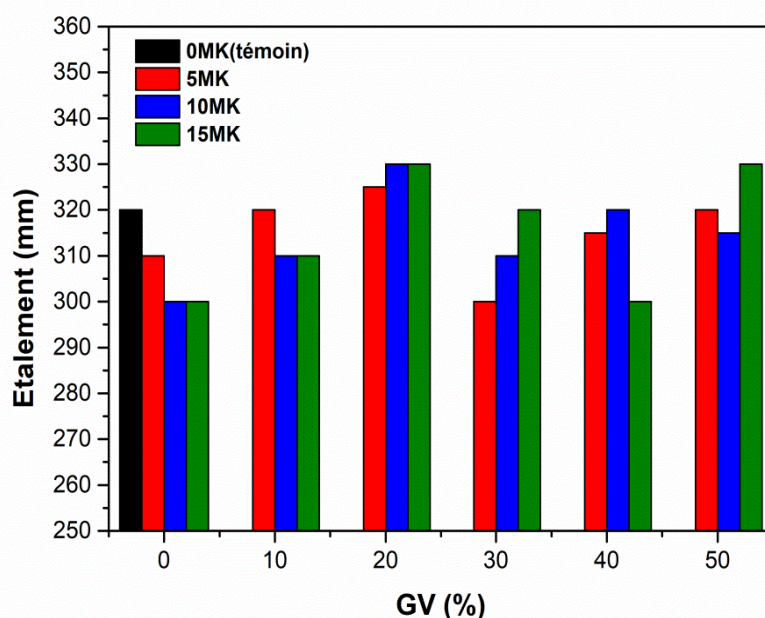


Figure III.7. Variation de l'étalement des MAP à base de MK et GV.

Cette réduction est plus prononcée au-delà de 10% de MK. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la finesse et de la surface spécifique de MK ce qui demande une grande quantité d'eau et dosage en SP pour mouiller la surface des particules et atteindre l'étalement souhaité. Melo et Carneiro [35] ont étudié effet des finesses et du contenu en MK dans le béton autoplaçant . Ils ont constaté que, le dosage de SP augmentait et l'écoulement des BAP diminuait, ceci est dû à la de la finesse élevée du métakaolin.

En outre, une augmentation de l'étalement est observée dans les mélanges incluant GV ce qui indique une augmentation de fluidité, grâce à l'effet synergique de GV et MK. L'utilisation de ses deux matériaux en combinaison a été trouvée bénéfique, car elle permet d'atténuer l'effet négatif de l'utilisation de la MK avec le ciment ordinaire sur la déformabilité des MAP surtout à des pourcentages de 10% et 15% de MK. Sharifi et al.[214] ont examiné l'efficacité de verre recyclé sous forme de granulats fins dans les mélanges des BAP. Les résultats indiquent que les caractéristiques de fluidité ont été augmentées à mesure que les déchets de verre étaient incorporés au mélange.

#### *III.2.3.2. Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V*

La figure III.8 montre la variation du temps d'écoulement par le mini V-funnel pour les MAP en fonction de la teneur en MK et GV. 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 [147]. Ces résultats montrent que l'introduction du MK seul a augmenté le temps d'écoulement et la viscosité plastique des MAP. Les mortiers contenant 15% de MK nécessitent un dosage plus élevé de SP pour obtenir des temps d'écoulement similaire à celui de MAPT. Güneyisi et al. [215] ont mené une étude expérimentale de l'effet du MK sur la viscosité du MAP et ont conclu que l'incorporation 15% de MK augmente la viscosité de mélange. La combinaison de GV et MK a réduit le temps d'écoulement et par conséquent de la viscosité des mélanges. Le temps d'écoulement varie de 3 sec à 4 sec pour les mélanges contenant des taux élevés en GV. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par plusieurs études [112, 133, 216].

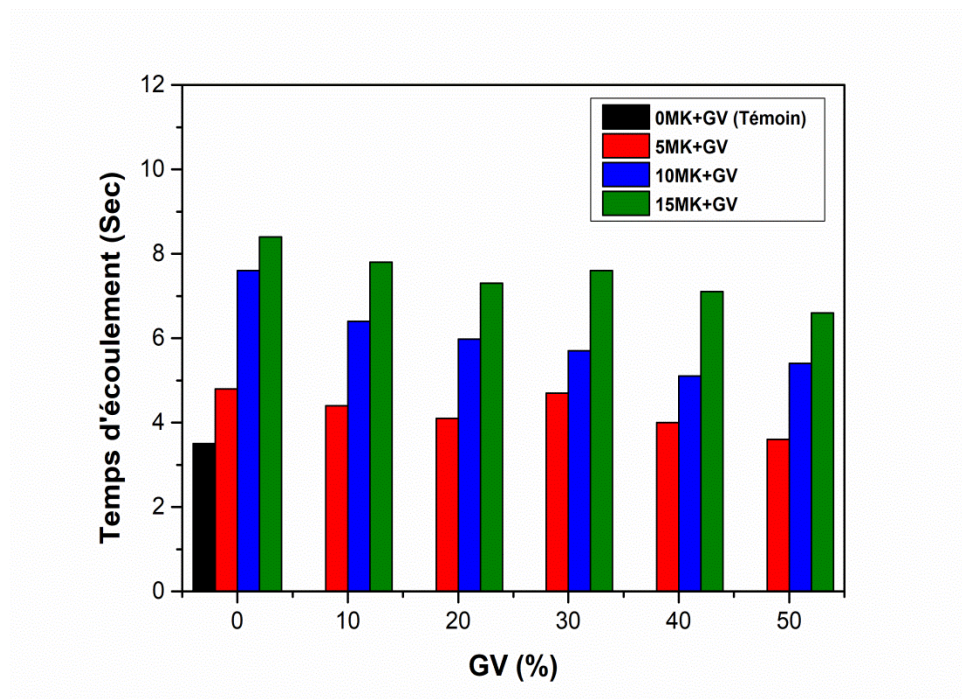


Figure III.8. Évolution du temps d'écoulement des MAP à base de MK et GV.

### III.3. Étude rhéologique des MAP

#### III.3.1. Seuil de cisaillement

La figure III.9 montre l'évolution du seuil de cisaillement des MAP, en fonction de la teneur en MK et GV. On peut constater que le MK provoque une augmentation du seuil de cisaillement, et ceci est confirmé par l'étalement des MAP. L'effet de MK sur le seuil de cisaillement des mortiers est plus prononcé à l'effet de combinaison de MK et de GV sur le comportement de mélange. En résumé, l'addition des MK affecte la fluidité des MAP et augmente la demande en eau et le dosage en SP. La diminution de fluidité et l'augmentation de seuil de cisaillement peuvent être attribuées à leur surface spécifique élevée et la teneur élevée en  $Al_2O_3$  du MK [187].

Parviz et al [217] ont rapporté que les propriétés rhéologiques des BAP avec le métakaolin atteint un seuil de cisaillement plus élevé par apport d'autres ajouts cimentaires.

Hassan et Lachemi [218] ont étudié l'effet du MK sur la rhéologie des BAP et ils ont constaté que le seuil de cisaillement augmente à mesure que le pourcentage de MK augmente.

De même, on peut voir aussi que l'augmentation des proportions de GV, dans les mélanges des MAP a diminué le seuil de cisaillement jusqu'à une valeur minimale de 2.5 Pa avec l'utilisation de 50% de GV. La réduction de seuil de cisaillement peut être attribuée à la cohésion interne du squelette granulaire et ainsi réduire les forces de frottement entre les différents constituants du mélange.

La morphologie et la texture de GV jouent un rôle important dans les comportements rhéologiques des MAP. En effet, selon Dreux et Quiroga [219, 220], l'effet des propriétés morphologiques du sable est plus important que celles des graviers. Ainsi, les particules cubiques ou sphériques se caractérisent par une surface spécifique plus petite que les particules de forme irrégulière (plates, anguleuses) qui nécessite une demande d'eau plus élevée.

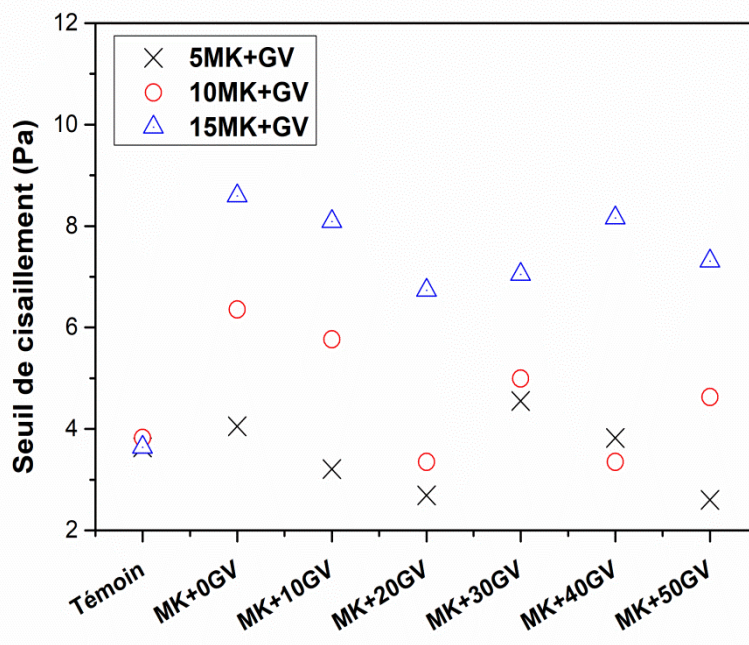


Figure III.9. Influence de la combinaison de MK et GV sur le seuil de cisaillement des différents MAP.

### III.3.2. Viscosité plastique

La figure III.10. Donne, la variation de la viscosité plastique en différents pourcentages de MK et GV pour différentes valeurs de gradients de vitesse. L'accroissement du dosage en MK, (5, 10 et 15%), conduit à l'augmentation de la concentration volumique et par conséquent favorise généralement l'accroissement de la viscosité du mélange. En effet, il semble que l'encombrement de particules de MK dans le MAP, agit en augmentant la viscosité plastique, du fait de l'augmentation des contraintes de frottement. Par ailleurs, plusieurs modèles disponibles [221] estiment que la viscosité augmente aussi avec la concentration volumique du solide. Les résultats trouvés confirment cette relation qui est très claire par l'augmentation des quantités des particules ultrafines de MK. Effectivement, l'augmentation de la teneur des additions engendre toujours un accroissement de dosage en SP, ce qui amène à des viscosités plus importantes. Cyr et Mouret [222], ont rapporté que l'utilisation de MK augmente la viscosité de la pâte de ciment, ce qui est bénéfique pour le BAP, car elle ralentit la sédimentation des particules et améliore la dispersion des solides à l'état plastique.

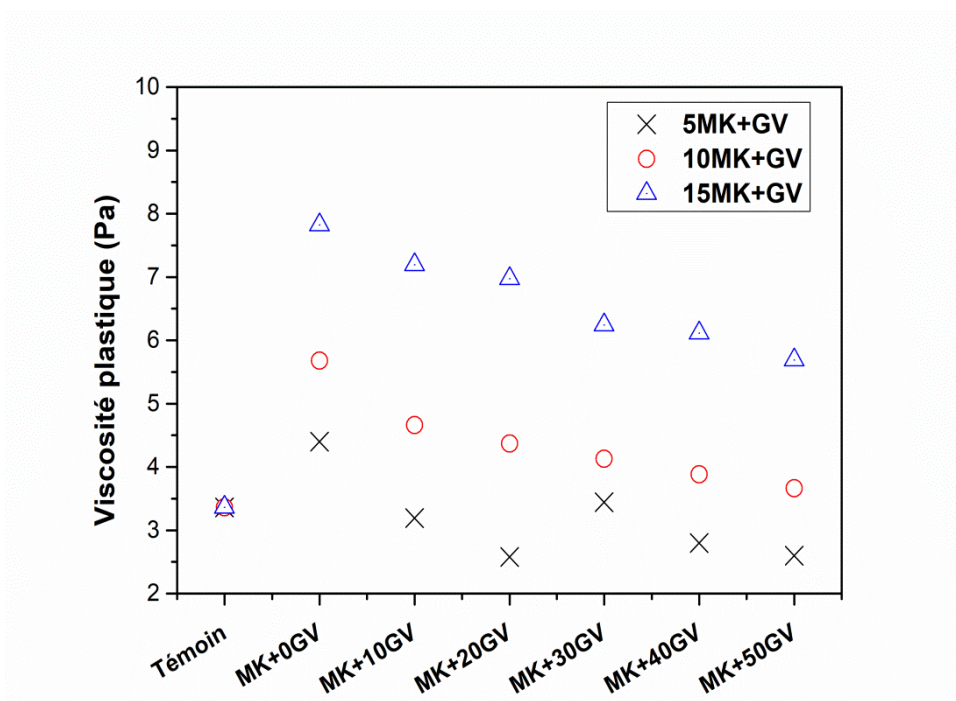


Figure III.10. Influence de la combinaison de MK et GV sur la viscosité de différents MAP.

Güneyisi et Gesoğlu [215] ont étudié l'effet du MK sur la viscosité du MAP et ont conclu que les mortiers contenant 15% de MK présentaient une viscosité élevée.

Néanmoins, il est intéressant de noter que la sensibilité de la viscosité plastique avec la concentration volumique reste assez faible dans le cas des granulats de verre, quel que soit le dosage de SP. L'augmentation du dosage en GV jusqu'à 50% maintient le caractère rhéoépaississant des MAP indépendamment du dosage en SP. Alors que les MAP avec le MK seul, dès qu'elle est incorporée au dosage de 15% semblent atténuer ce comportement, mais avec un dosage en SP élevée.

Selon certains auteurs ce résultat est dû à l'expression mathématique du modèle. Ceci pourrait sous-estimer les valeurs du seuil de cisaillement ou surestimer celles de la viscosité dans le cas d'un comportement rheofluidifiant. En revanche, les paramètres rhéologiques estimés par le modèle de Bingham modifié se situent toujours entre les valeurs d'Herschel-Bulkley et ceux de Bingham.

#### III.3.3. Corrélation entre les propriétés rhéologiques

Il est avantageux d'utiliser des tests simples tels que l'essai d'étalement au mini-cône et d'écoulement au l'entonnoir en V, car un rhéomètre n'est pas toujours disponible dans l'industrie de la construction et notamment dans les chantiers. L'établissement de relations entre les paramètres de rhéologie et les propriétés empiriques à l'état frais ont fait l'objet de nombreux articles de recherche [223]. Des corrélations entre les propriétés rhéologiques ont été élaborées et représentées dans les figures III.12 et III.13.

La courbe de la figure III.11 donne l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de l'étalement et bonne corrélation très acceptable avec un coefficient de  $R^2$  supérieur à 0.9 a été obtenue.

Des résultats similaires ont été obtenus par autres chercheurs [224-226]. Par conséquent, une indication de la valeur de cisaillement peut être obtenue en utilisant le teste d'étalement au cône. Ce résultat est attendu, car le mortier ne peut s'écouler dans le mini-cône que si la contrainte due à son poids propre est suffisamment élevée, c'est-à-dire

plus grande que le seuil de cisaillement [227]. Pour cette raison, on dit souvent qu'il y a une relation directe entre l'étalement et le seuil de cisaillement.

La figure III.11 indique une diminution de l'étalement pour l'ensemble des MAP à base de MK seul engendre à une augmentation remarquable du seuil de cisaillement, quel que soit le pourcentage de GV incorporé dans le mélange.

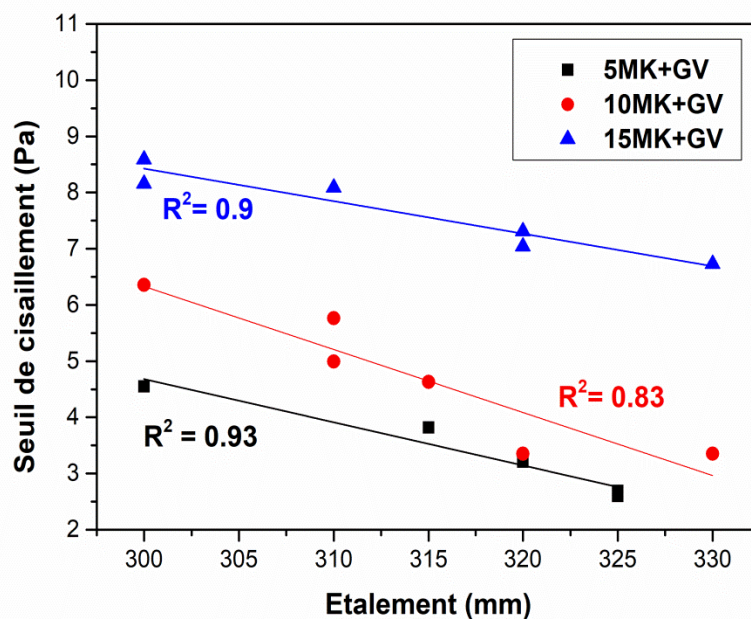


Figure III.11. Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement.

La relation entre la viscosité et le temps d'écoulement des MAP est présentée sur la figure III.12. Une relation acceptable linéaire a été obtenue avec des acceptables valeurs de coefficient de corrélation. Les corrélations obtenues dans notre étude sont en accord avec d'autres recherches.[224, 228].

D'aloia et al [226] ont étudié le comportement rhéologique des pâtes de ciment. Les résultats de corrélation entre les essais empirique et rhéologique montrent qu'il existe une relation entre les paramètres de rhéologie et les propriétés empiriques à l'état frais.

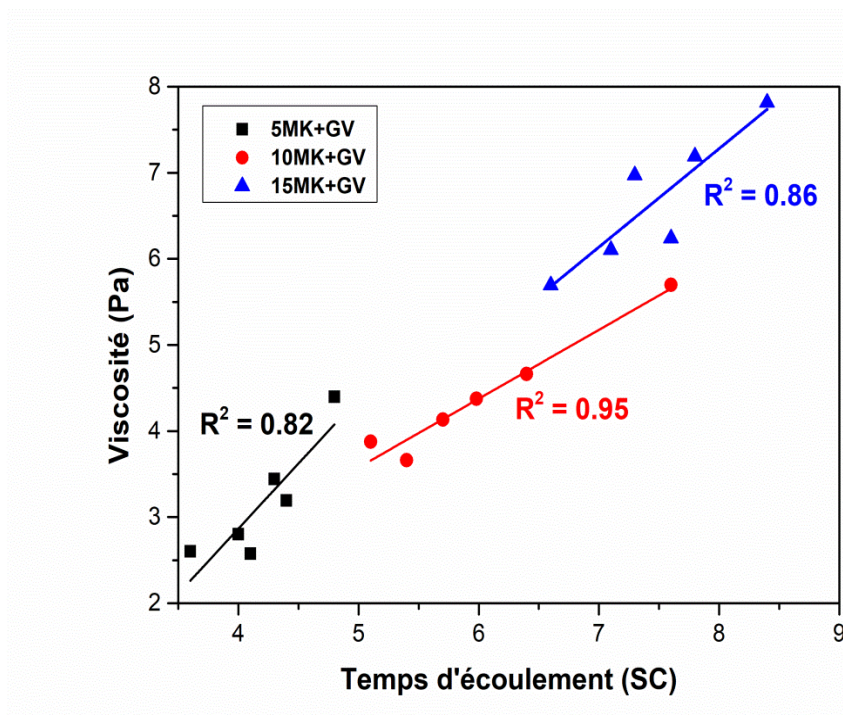


Figure III.12 Corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement.

### III.4. ÉTUDES DES BAP

#### III.4.1. Étalement et temps $T_{50}$ au cône d'Abrams

Les résultats d'étalement et le temps d'écoulement  $T_{50}$  des différents BAP sont présentés sur les figures III.13 et III.14 respectivement. Les résultats montrent que, les diamètres d'étalement de tous les mélanges des BAP sont situés entre (700 et 800 mm), ce qui indique une grande déformabilité des BAP. Les valeurs d'étalement sont acceptables par les recommandations EFNARC et sont classées dans la catégorie (SF2-SF3) [147].

D'après les figures, nous remarquons une réduction de l'étalement, aux mélanges confectionnés avec les autres teneurs 5%MK et 10%MK. Cette réduction de fluidité est attribuée à la forte activité chimique du MK, qui entraîne une plus grande consommation d'eau et de SP (l'accélération de l'hydratation du ciment suite à la réaction pouzzolanique). La réduction de l'étalement produite par le MK est due aussi par à la surface spécifique élevée, ce qui conduit à une plus grande absorption d'eau [37, 229].

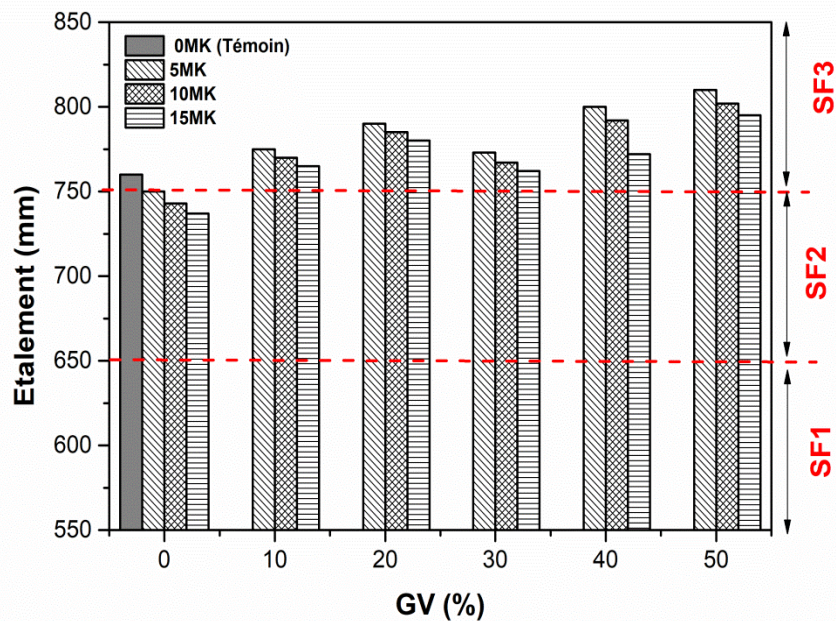


Figure III.13. Étalement en fonction de MK et GV pour les différents BAP

L'analyse des résultats montre aussi l'utilisation de GV dans les mélanges fournit un effet bénéfique sur de l'étalement des BAP. Le plus petit diamètre de l'étalement est celui du BAP avec 5%MK ,10%MK et 15%MK est de 750 mm 745 mm 740 mm respectivement, alors que le meilleur est celui du BAP, qui contient de 50 % de GV, est de 800 mm 780 mm 762 mm pour les mélanges 5MK+50GV ,10MK+GV et 15MK+GV respectivement.

Cette amélioration du diamètre d'étalement a été en raison de la texture du verre qui a rempli les vides entre les granulats grossiers mieux que le sable naturel ; le sable de verre a une surface lisse et faible absorption d'eau [104, 230].

Toutefois, il y a eu une légère diminution de l'écoulement des mélanges de BAP avec 30% de GV par rapport à ceux avec un GV de 10 % et de 20 % ; cela était dû à la différence du dosage de SP, car il faut noter que chaque pourcentage de GV exige la quantité de SP nécessaire pour atteindre la fluidité visée pour obtenir des BAP sans ségrégation et sans ressuage.

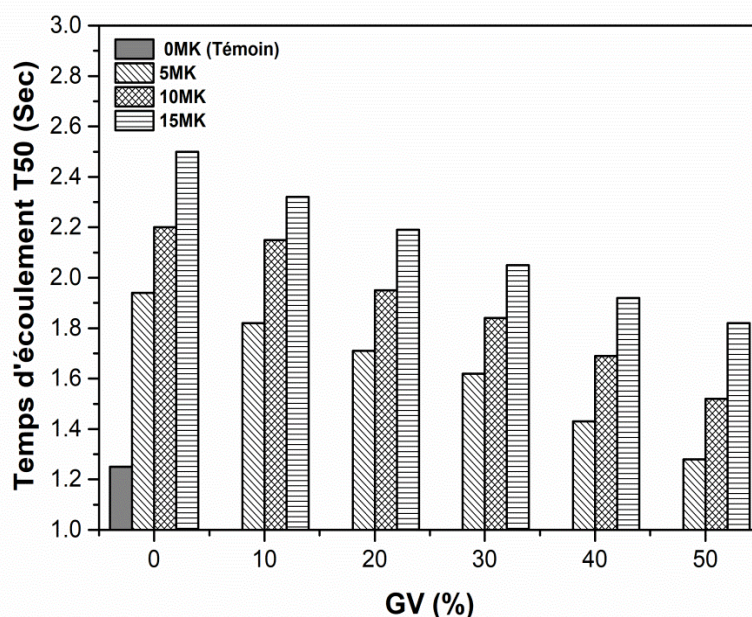


Figure III.14. Évolution du temps d'écoulement T<sub>50</sub> en fonction de MK et GV pour les différents BAP.

La figure III.15 illustre l'évolution du temps d'écoulement (T<sub>50</sub>) en fonction de MK et GV. Les valeurs de temps d'écoulement T<sub>50</sub> montrent un temps compris entre 2 et 4 secondes que celles proposées par Domone et al [153]. Nous remarquons une légère variation de T<sub>50</sub> est enregistrée lorsqu'en augmentant la substitution partielle du ciment par le MK, les mélanges ayant 15% présentent la plus grande valeur de T<sub>50</sub>.

De plus, la figure III.15 indique aussi également que les valeurs T<sub>50</sub> obtenues pour les mélanges dans lesquels le sable a été remplacé par les GV, qui sont inférieures à celles obtenues pour les mélanges avec substitution de ciment par le MK seul, où la valeur la plus faible mesurée est obtenue lorsque les GV dépassent ou égale 20%. Une remarque concernant le mélange contient 30% de GV, ce mélange donne une légère diminution de l'écoulement ceci explique par la différence de dosage en SP.

### III.4.2. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

La figure III.15 montre la variation du temps d'écoulement pour différents mélanges des BAP étudiés. Selon les résultats de l'essai de l'entonnoir en V, tous les mélanges des BAP étaient très stables parce que leur temps d'écoulement était inférieur à la valeur recommandée par EFNARC [147], ce qui indique des bons indices de viscosités et résistances à la ségrégation. On peut noter d'après la figure III.16 que l'ajout de MK augmente le temps d'écoulement des BAP par rapport au BAPT, mais toujours les temps d'écoulement enregistrés répondent aux propriétés des BAP par l'augmentation de dosage en SP. On peut dire que, même avec des dosages modérés en MK, le temps d'écoulement mesuré montre que l'incorporation de MK augmente la viscosité des BAP et ceci est dû à l'augmentation de la surface spécifique de MK.

À titre d'exemple, le mélange témoin BAPT et le mélange avec 5% de MK ont montré la valeur inférieure du temps d'écoulement de l'entonnoir en V qui est bien inférieure à 8 s, indiquant la viscosité la plus faible avec un dosage en SP s'est avéré être le minimum. Cette constatation est cohérente avec celle de Barbhuiya [231]. Pour les autres mélanges au-delà de 5% de MK ont montré des valeurs de temps d'écoulement plus élevées dans la plage de 8 à 12 s. Uysal et Sumer [232] ont rapporté que la valeur de temps d'écoulement en V plus long ce dernier représente une viscosité plus élevée du mélange et il est directement lié à une meilleure résistance à la ségrégation.

Rahmat et Yasin [212] ont étudié les propriétés à l'état du BAP avec le MK et ont noté que le temps d'écoulement augmentait à mesure que la quantité de MK augmentait avec un dosage plus élevé de SP. De plus, le remplacement du sable par les GV a réduit le temps d'écoulement qu'il a convergé plus rapidement vers le seuil inférieur. Les meilleurs temps d'écoulement se sont produits lorsque en ajoutant 50% de verre dans tous les mélanges de BAP, ce qui réduit la viscosité et également facilité la pompabilité des bétons dans les zones confinées.

La figure III.16 illustre une bonne corrélation linéaire entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation acceptable ( $R^2=0.8$ ).

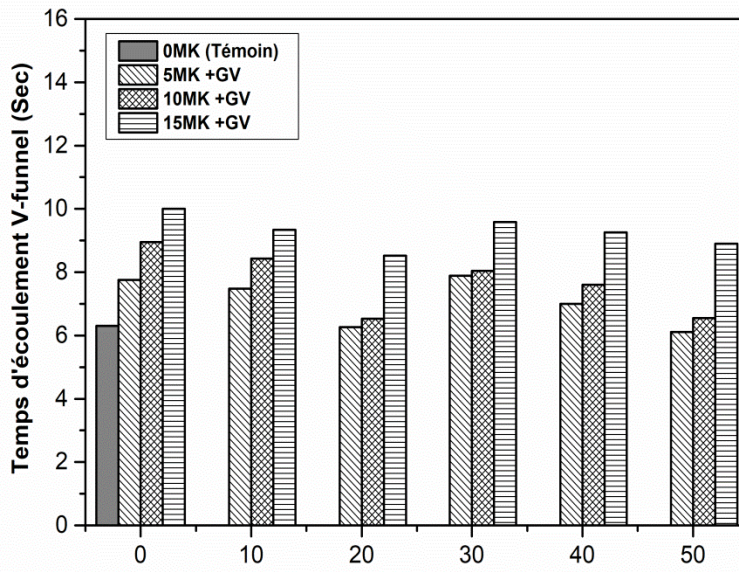


Figure III.15. Évolution du temps d'écoulement en fonction de MK et GV pour les différents BAP.

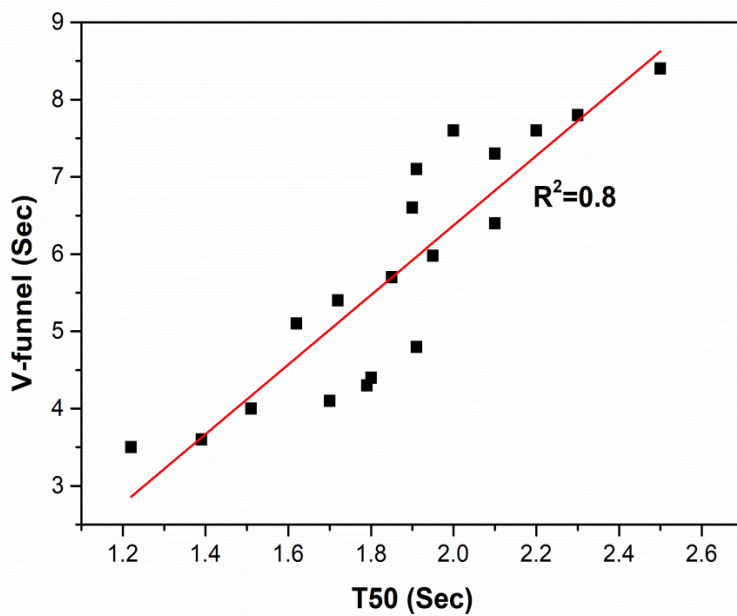


Figure III.16. corrélation entre le temps d'écoulement  $T_{50}$  et TV-F.

### III.4.3. Essai de la Boîte en L (L-Box)

La variation du rapport  $H_2/H_1$  en fonction du pourcentage de MK et GV est représentée sur la figure III.17. En ce qui concerne la capacité de remplissage estimée par le rapport  $H_2/H_1$  mesuré par le test de la boîte en L, tous les groupes des BAP ont donné une bonne capacité de remplissage, mobilité, et passage à travers les zones fortement confinées. On remarque que la substitution du ciment par le MK affecte la capacité de remplissage et par conséquent le rapport  $H_2/H_1$  qui varient de 80 à 86%, un aperçu conclu sur l'effet de MK sur la capacité de passage révèle que le remplacement de MK jusqu'à 10% satisfait généralement les exigences de comportement à l'état frais liées à la capacité de passage et de remplissage. On remarque aussi que la présence des GV dans les mélanges des BAP offre un avantage pour donner une capacité rapide de passage entre les armatures de la boîte en L est convergé plus rapidement vers le seuil supérieur ce qui augmentait les valeurs des rapports  $H_2/H_1$  avec 98%.

Kou et Poon [128] ont étudié les propriétés des BAP préparés avec des granulats du verre recyclé et ils ont constaté que la capacité de remplissage de la boîte en L est améliorée lorsque la quantité de verre recyclé a augmenté. Wang et al. [233] ont étudié l'effet de l'incorporation du granulats de verre sur les propriétés des bétons autoplacants. Les résultats montrent que la capacité de remplissage en boîte U est améliorée lorsque le sable naturel est partiellement remplacé par les granulats de verre .

Emam Ali et Tersawy [92] ont préparé un BAP avec un verre recyclé.. Ils ont remarqué une augmentation de rapport  $H_2/H_1$  avec l'augmentation de pourcentage de granulats de verre recyclé. Grdić et al. [234] ont étudié les propriétés des bétons autoplacants avec les granulats de verre. Ils ont remarqué que la capacité de passage mesuré par L-box augmente avec l'augmentation de la teneur en granulats de verre.

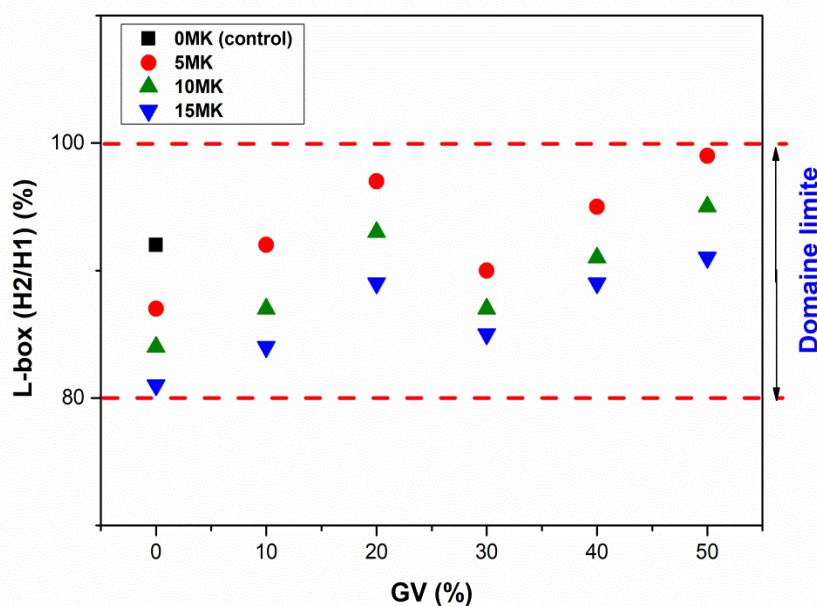


Figure III.17. Rapport  $H_2/H_1$  en fonction de MK et GV pour les différents BAP.

#### III.4.4. Stabilité au Tamis

Les résultats de stabilité au tamis sont traduits en histogrammes sur la figure III.18. On constate que les pourcentages de laitance passant à travers le tamis sont compris entre (2 à 5 %) pour les séries de BAP incorporant de MK seul, tandis que ces pourcentages augmentent et légèrement convergent vers la limite critique de ségrégation pour les séries de BAP incorporant le MK et les GV surtout avec des pourcentages de 50%, la substitution de ciment par des MK présente une diminution des valeurs de pourcentage de laitance. Ce résultat pourrait être attribué à la surface spécifique de MK, ce qui nécessite une quantité d'eau supplémentaire pour mouiller ces particules.

Généralement, on peut dire que les résultats obtenus montrent que tous les BAP confectionnés présentent une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage. En outre, l'examen visuel des BAP révèle que ces derniers sont homogènes et stables. L'utilisation bénéfique de MK permet d'augmenter le volume de pâte.

De ce fait, le mortier est suffisamment visqueux pour maintenir les gros granulats et par conséquent améliorer la stabilité du béton vis-à-vis de la ségrégation. Toutefois, au-delà de

20% du remplacement du GV, la stabilité des mélanges des BAP a été diminuée et donne un béton moins visqueux et passe facilement à travers le tamis, mais les valeurs sont acceptables par rapport les recommandations. Safawi et al. [235] ont montré que le temps d'écoulement au V-funnel est un outil adapté pour décrire la tendance de la ségrégation. Ainsi pour de très faibles temps d'écoulement (inférieures à 2 secondes) la tendance au béton à ségréger est très élevée, ce qui implique que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségrégués.

Cette constatation est similaire à notre résultat de temps d'écoulement et la stabilité aux tamis. Umehara et al [236] ont rapporté que la diminution de la viscosité du béton est compatible avec une réduction de la stabilité. Ces résultats seront confirmés par les résultats de viscosité plastique dans le paragraphe III.3.3.

Les principaux effets observés suite aux essais sur les MAP et BAP aux états frais sont synthétisés dans le tableau III.2.

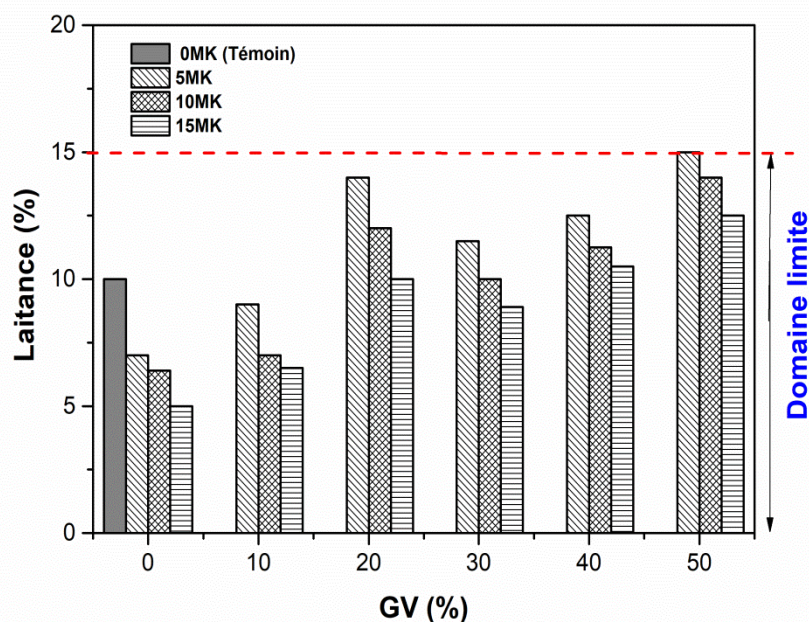


Figure III.18. Indice de ségrégation en fonction de MK et GV pour les différents BAP.

### CHAPITRE III : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT FRAIS

*Tableau III.2. Principaux effets observés suite aux essais sur MAP et BAP aux états frais.*

Mélanges	Demande en SP		Fluidité		Viscosité	
	Effet	Optimum	Effet	Optimum	Effet	Optimum
Témoin	–	–	–	–	–	–
5MK+0GV	↑		↑ +SP		↑ +SP	
5MK+10GV	↓		↑ +SP		↑ + SP	
5MK+20GV	↓↓		↑↑↑		↑↑↑	
5MK+30GV	↓↓↓		↑↑		↑↑	
5MK+40GV	↓↓↓		↑↑↑		↑↑↑	
5MK+50GV	↓↓↓	•	↑↑↑		↑↑↑	•
10MK+0GV	↑↑		↑ +SP		↑ +SP	
10MK+10GV	↓		↑ +SP		↑ +SP	
10MK+20GV	↓		↑↑ +SP		↑↑ +SP	
10MK+30GV	↓↓		↑		↑	
10MK+40GV	↓↓		↓↓		↓↓	
10MK+50GV	↓↓	•	↑↑		↑↑	•
15MK+0GV	↑↑↑		↑ +SP		↑ +SP	
15MK+10GV	↑↑		↑ +SP		↑ +SP	
15MK+20GV	↑		↑↑ +SP		↑↑ +SP	
15MK+30GV	↓		↑		↑	
15MK+40GV	↓↓		↑↑		↑↑	
15MK+50GV	↓	•	↑		↑	•

NOTES : ↑ Faible effet positif pour la **fluidité et la viscosité**, ↑↑ Moyen, ↑↑↑ Bon.

↑ Faible effet négatif pour la **demande en SP**, ↑↑ Moyen, ↑↑↑ Mauvais.

↓ Faible effet négatif pour la **fluidité et la viscosité**, ↓↓ Moyen, ↓↓↓ Mauvais.

↓ Faible effet positif pour la **demande en SP**, ↓↓ Moyen, ↓↓↓ Bon.

↓ ↑ : Excellent et pire selon le cas (fluidité ou SP).

+ SP : Dosage additionnel en superplastifiant , + SP : additionnel pire.

• : Optimum choisi.

#### III.5. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE RHEOLOGIQUE

Cette partie récapitule les principaux résultats des essais rhéologiques. L'objectif, consiste à étudier l'effet de l'ajout de MK et GV sur le comportement rhéologique des BAP. L'influence de SP sur les mélanges MAP avec les matériaux ajoutés (MK+GV) et définit le dosage optimal pour chaque quantité introduite. En ce qui concerne l'étude des propriétés rhéologiques des MAP en fonction de la teneur en MK et GV. Les résultats de cette partie montrent que l'augmentation du dosage en MK accroît la demande en SP des mélanges pour avoir les propriétés autoplaçantes des MAP.

De plus une augmentation de l'étalement et son seuil de cisaillement ont été obtenus pour les mélanges avec le MK seul. Par contre une diminution des propriétés précédentes a été obtenue avec l'incorporation de GV. Les mêmes constatations ont été enregistrées par le temps d'écoulement et la viscosité plastique. À ce stade les résultats d'ouvrabilité entre l'étalement et le temps d'écoulement présentent une bonne corrélation avec ceux d'essais rhéologiques mesurés par le rhéomètre.

Des conclusions similaires peuvent être tirées pour l'étude des propriétés des BAP. Les résultats ont permis de conclure que la méthode Okamura pouvait être utilisée dans les formulations avec optimisation de la teneur en sable et en SP. Un pourcentage de 50% du sable a été utilisé dans les compositions des BAP. À différentes teneurs en MK et GV, les caractéristiques rhéologiques sont satisfaisantes et répondent aux recommandations de la fabrication des BAP.

Grâce à l'effet synergique de la combinaison de GV et le MK dans les mélanges des BAP, offert un avantage économique et technique en termes de réduction de coût des BAP par la réduction de l'utilisation du SP.

## **CHAPITRE IV**

**EFFET DE GV ET LE MK SUR LE  
COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT**

**DURCI**

## CHAPITRE IV

# EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI

### IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons exposer et analyser les résultats des différents essais effectués à l'état durci sur les mortiers et bétons autoplaçants à base de métakaolin comme ajout cimentaire et granulats de verre, et on essaye de comparer nos résultats avec les résultats d'autres chercheurs existant dans la bibliographie ainsi, on envisagera à mettre en évidence la caractérisation de la structure poreuse des bétons étudiés sur la base d'essais couvrant les différents mécanismes de transfert (la porosité accessible à l'eau, la perméabilité a gaz , la diffusion et l'absorption). L'ensemble de ses propriétés sont caractérisables à partir de la structure poreuse du béton, par laquelle les substances agressives sont véhiculées. De ce fait, optimiser le réseau poreux du béton c'est accroître la durée de vie du matériau. Le chapitre se termine par une étude sur l'impact environnemental (émission de CO<sub>2</sub> et émission d'énergie).

### IV.2. ÉTUDE DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS

#### IV.2.1. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression à différents âges (3, 7, 28 et 90 jours) pour les différentes MAP confectionnés sont représentés dans les figures IV.1 (a, b et c). Au regard dans les figures IV.1, on constate que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de GV dans les mélanges étudiés. On note une diminution de l'ordre de 13%, 20% et 21%, pour 10MK + 50GV, 15MK + 50 GV et 5MK + 50 GV respectivement, par rapport au mélange avec MK sans GV (MK + 0 GV). La chute de la résistance est liée à l'adhérence faible entre la surface lisse des particules de GV et la pâte de ciment.

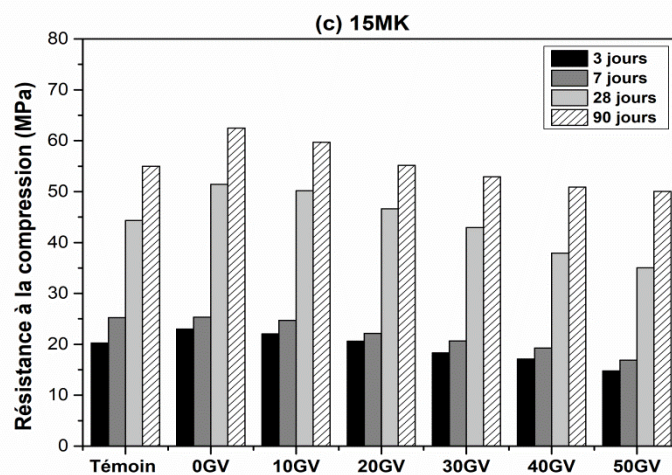
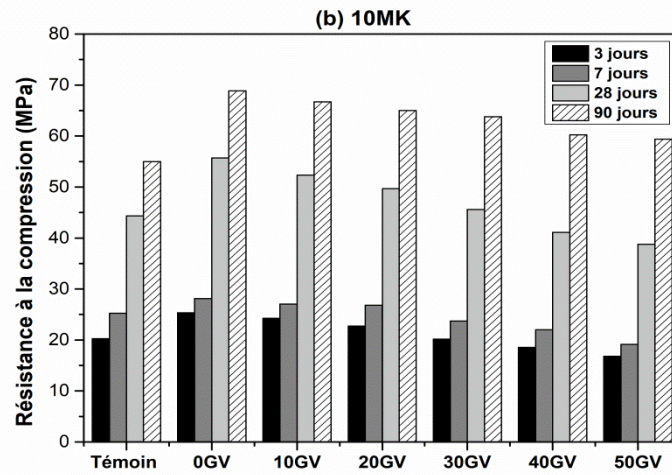
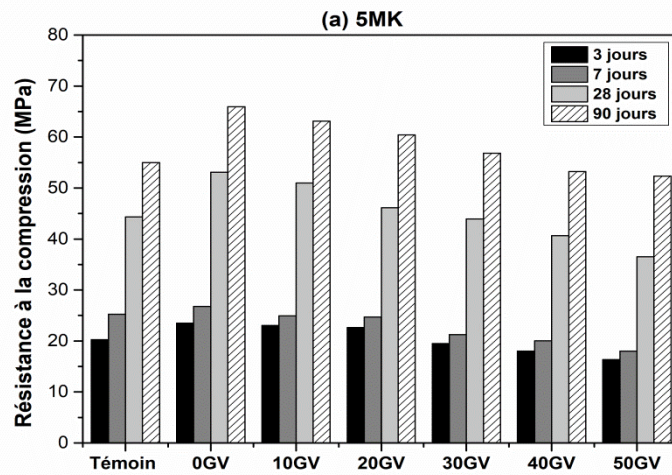


Figure IV.1. Résistance à la compression des mortiers en fonction de type de MK et GV.

Gayal Kuruppu, et al. [237] ont étudié l'effet de granulat de verre sur les propriétés mécaniques des bétons. Ils ont remarqué que la résistance à la compression est inférieure avec un taux de 16 % à celle du béton de référence. Wen Song et al. [114] ont réalisé une étude sur l'effet de la taille et du contenu des GV recyclé sur les propriétés mécaniques du béton. Ils ont trouvé que la substitution partielle du sable naturel par les GV dans la composition des bétons, contribué à la réduction des résistances mécaniques.

Cependant l'incorporation de MK dans la matrice cimentaire a un effet positif sur l'amélioration des résistances mécaniques des MAP par rapport au mélange témoin (0MK + 0 GV). La résistance à la compression à l'âge de 28 jours des MAPT augmente de 55 MPa à 59 MPa pour le mélange (10MK + 50GV) avec un taux d'amélioration de 7,27%. Cette augmentation de la résistance à la compression pourrait être attribuée à l'effet du remplissage où les particules de MK remplissent l'espace entre les particules de ciment, et à la réaction pouzzolanique de la phase amorphe (silice) du MK avec l'hydroxyde de calcium C-H qui produit le C-S-H secondaire, ceci conduit à un raffinement des pores et micropores et résulte donc une matrice cimentaire plus dense [213]. Rohit et al. [238] ont étudié l'effet de l'incorporation du MK sur la résistance à la compression de béton. Ils ont démontré que la substitution partielle (10%) du ciment par le MK dans les mélanges de béton, contribue à l'amélioration des résistances mécaniques. Au-delà de 10% de substitution du MK les résistances diminuent.

Un examen est effectué par la microscopie électronique à balayage (MEB) sur des échantillons de MAP. Les figures IV.2, IV.3 et IV.4 représentent des images de MEB pour les mélanges 5MK + 50GV, 10MK + 50GV et 15MK + 50GV respectivement. D'après ces images, on peut voir que les mélanges avec 5MK + 50GV, 10MK + 50GV ayant une structure dense et une zone de transition interfaciale (ZTI) uniforme entre la pâte et les GV par rapport au mélange 15MK + 50GV qui présentait plus des pores, des plus ou moins longues dans la ZTI autour des granulats. Ces constatations peuvent expliquer la mauvaise adhérence entre GV et ciment, ce qui affecte négativement la résistance à la compression des MAP avec des teneurs élevées en MK. Muduli et al [239] ont examiné l'effet de l'incorporation de MK et les granulats recyclés sur les propriétés du béton. Ils ont trouvé que les propriétés mécaniques de béton sont significativement influencées par

## CHAPITRE IV : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI

l'adhérence entre la matrice cimentaire et les particules des granulats au niveau la ZTI. Ils ont remarqué aussi que la présence du 10% de MK contribue à améliorer la ZTI entre les granulats et la pâte de ciment.

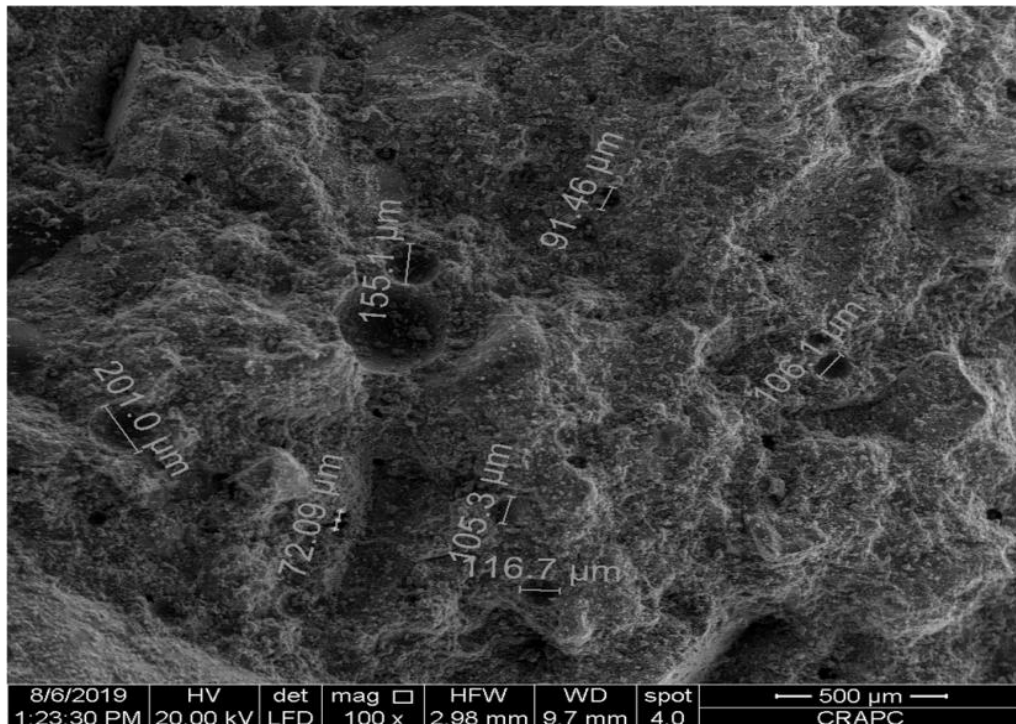


Figure IV.2. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base 5MK+50GV.

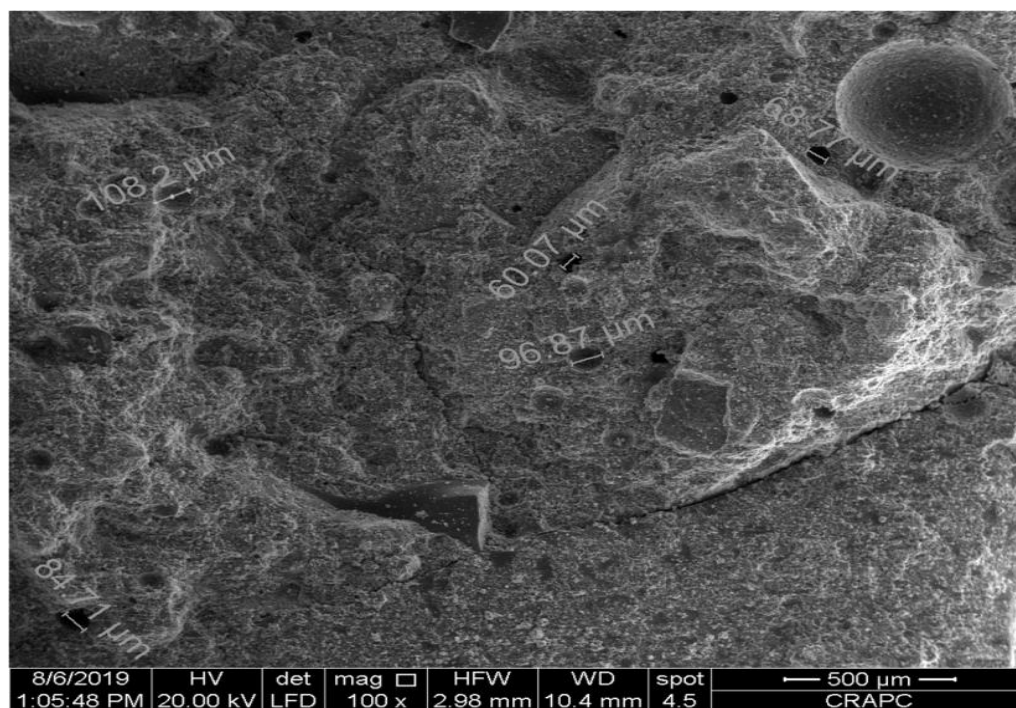


Figure IV.3. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base 10MK+50GV.

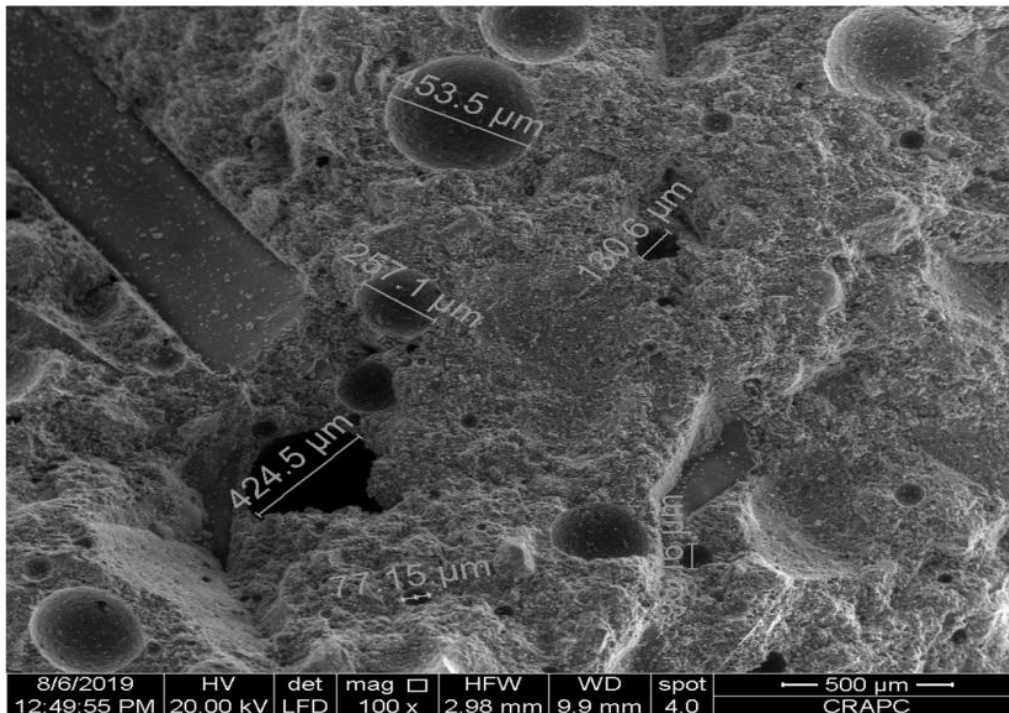


Figure IV.4. Examen au MEB du mélange pour le MAP à base 15MK+50GV.

#### IV.2.2. Absorption d'eau

Lorsque la surface du béton durci est exposée à l'humidité, les pores du béton absorbent l'eau par aspiration capillaire. La détérioration sous cycle humide-sec et la durée de vie du béton peuvent être liées à son taux de sorptivité capillaire. L'influence de MK et GV sur l'absorption d'eau est présentée dans la figure IV.5. Les valeurs de cette figure montrent une diminution de l'absorption avec le temps, ceci pour tous les mélanges. D'après cette figure IV.5 on observe que le mélange de référence (MAPT) est celui qui a le coefficient d'absorption le plus grand, alors que le coefficient d'absorption des autres mélanges est plus petit, et diminue au fur et à mesure que la teneur en GV augmente. On remarque d'après les résultats obtenus une réduction significative de l'absorption d'eau surtout lorsque leur pourcentage de GV combiné atteint 50%. Cette réduction était de l'ordre de 13, 22, et 12% pour les mélanges avec 5MK + 50GV, 10MK + 50GV et 15MK + 50GV respectivement. Cette valeur faible de l'absorption d'eau est liée à la nature de verre qui est caractérisé par un coefficient d'absorption faible, à la granulométrie grossière de GV (0-5mm).

Jared et al. [240] ont étudié l'absorption d'eau par capillarité des mortiers à base des granulats de verre recyclé. Ils ont constaté que l'absorption d'eau diminue avec l'utilisation de verre comme granulats, ceci est fournie un volume imperméable dans la matrice en béton, ce qui rend plus difficile pour l'eau de pénétrer dans le béton.

Selon les résultats de la figure IV.5, on note aussi que la capacité d'absorption d'eau diminue avec l'ajout de MK. La valeur optimale de l'absorption d'eau est produite dans la série des MAP avec 10% de MK, ceci est dû à la faible porosité par rapport aux autres séries (5% MK et 15% MK), l'augmentation de la porosité est due à la vitesse d'hydratation plus lente du MK [241]. Ces résultats montrent que l'ajout de MK a diminué la capacité d'absorption par diminution de la porosité, c'est-à-dire, la diminution du nombre des vides et pores existant dans le mortier qui devient ainsi plus compact, plus résistant et plus étanche à l'eau. Nos résultats vont dans le même sens que ceux des travaux de Khatib et al [242]. Ling et al [243] ont étudié la faisabilité d'utiliser du verre recyclé dans les mortiers de ciment, pour cette étude le ciment a été remplacé par le MK à différents niveaux de 10, 20 et 30%. Les résultats ont rapporté que l'augmentation de la porosité peut être attribuée à l'hydratation plus lente du MK par rapport au ciment.

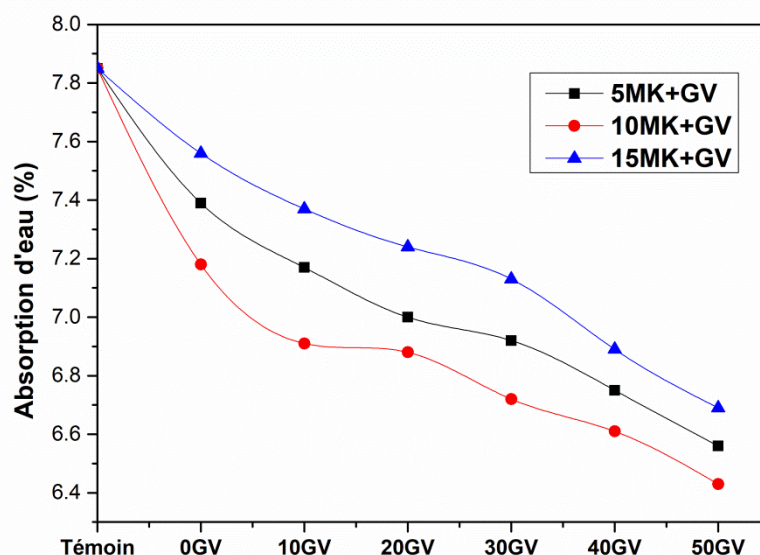


Figure IV.5. Évolution de l'absorption pour les différents MAP.

### IV.2.3. Retrait

La figure IV.6 montre l'évolution du retrait des échantillons des MAP avec le MK et les GV en fonction du temps allant jusqu'à 90 jours. D'après les résultats, l'augmentation de la teneur en GV a entraîné une réduction des valeurs de retrait des MAP. Il est important de noter que le retrait de séchage ultime à long terme du mortier contenant 50% de GV (M15GV50) était 17% inférieur à celui du témoin (MAPT). Cela peut être dû à la capacité d'absorption inférieure du GV [120].

Liu et al. [244] ont étudié le retrait de séchage des bétons à base des granulats de verre recyclé. Ils ont constaté que le retrait diminue avec l'utilisation de verre comme granulats, et l'utilisation des granulats grossiers de verre (5 mm) a permis de diminuer le retrait par rapport aux granulats fins.

Tuaum et al. [245] ont examiné l'influence de granulats du verre recyclé sur le retrait de séchage des bétons. Ils ont trouvé que, la diminution de retrait avec l'augmentation de granulats de verre a un effet positif en termes de variation de longueur dans les premiers jours de durcissement du matériau.

D'après la figure IV.6, on peut voir que le retrait de séchage de MAP intégrant 50% GV avec différents pourcentages de MK diminue avec l'augmentation du contenu MK. La diminution du retrait de séchage par l'ajout de MK est évidemment prise en charge par la littérature [67]. L'inclusion de MK a réduit le retrait de séchage par la réduction de la quantité d'eau évaporable en raison d'un taux plus lent d'hydratation de MK, ce dernier joue un rôle positif dans le retrait du béton au cours des 4 premiers jours. Ling et Poon [133] ont étudié les propriétés du mortier architectural préparé avec du verre recyclé comme granulats fins avec différentes tailles et le MK comme ajout cimentaire. Ils ont remarqué une diminution des retraits enregistrés pour les deux types de matériaux ajoutés, cependant, la combinaison de ces derniers donne des diminutions plus que l'utilisation de chacun seul.

Les valeurs des tests de retrait de séchage à 56 jours pour tous les mélanges des MAP étaient inférieures à 0,075%. Ces valeurs sont acceptables par la norme australienne AS 3600 [246].

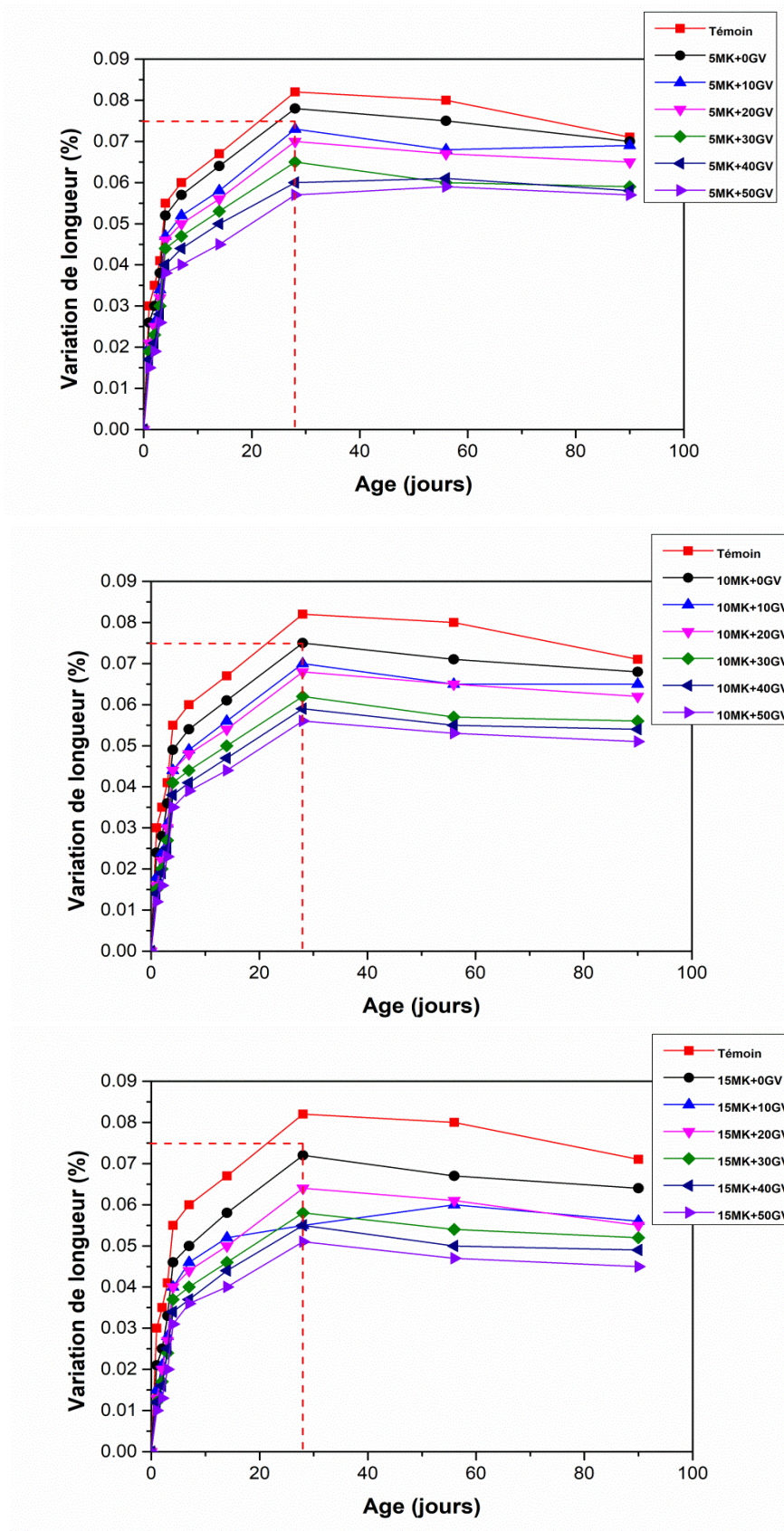


Figure IV.6. Retrait en fonction de type de MK et GV.

#### IV.2.4. Réaction alcali silice

La figure IV.7 montre des observations par le MEB des mortiers avec 50% de GV après 90 jours de durcissement. La figure révèle la présence du gel expansif et quelques fissures, ce qui confirme les résultats de la mesure de l'expansion. Les courbes schématisées par la figure IV.8 (a, b et c) représentent la variation de la réaction alcali silice (RAS) pour les différentes compositions des MAP en fonction de la durée d'immersion dans la solution de l'hydroxyde de sodium (NaOH) de 1% de concentration. Nous constatons une augmentation continue de l'expansion de tous les mélanges jusqu'à 28 jours, la cinétique initiale varie entre 0,01% à 0,062% à 3 et 7 jours respectivement. La minéralogie de GV pourra induire une cinétique rapide ou lente de la RAS à 14 et 28 jours. À la fin de 28 jours, l'expansion la plus grande a été constatée dans les échantillons contenant 50% de GV. Selon AS 1141.60.1 [247], le GV peut être classé comme matériau réactif ce qui explique le mécanisme de RAS par le processus chimique entre les GV siliceux et les ions hydroxyle de ciment, qui conduit à l'évolution du gel visqueux alcalino-silicate [248]. Cette augmentation du volume est due au rapport  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  plus élevé, car les ciments sont constitués des produits d'hydratation riches en calcium (Ca), et fournissent suffisamment des ions de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans la solution interstitielle, qui facilement réagit avec la silice ( $\text{SiO}_2$ ) de GV et forme des composants expansifs [249].

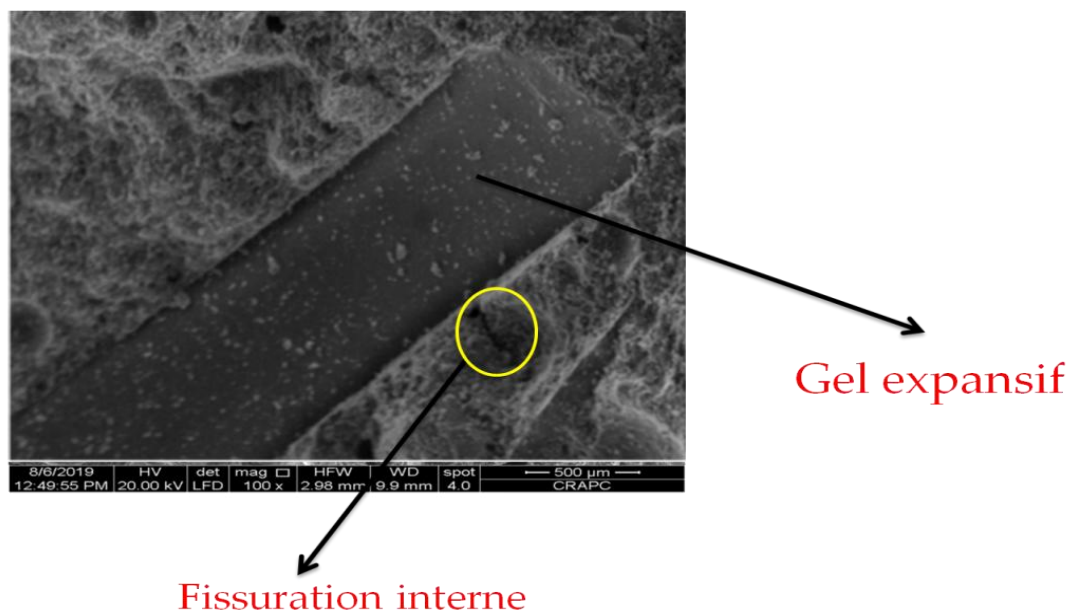


Figure IV.7. Observations par le MEB des mortiers avec 50% GV.

Ce résultat est en accord avec d'autres études [110, 128]. Yuksel et al.[250] ont étudié l'effet de granulats de verre sur la réaction alcalis silice. D'après les résultats obtenus, ils ont remarqué que la RAS augmente avec l'augmentation de granulats de verre.

En revanche, les valeurs de RAS dans les mortiers de référence étaient beaucoup plus faibles que celles obtenues dans les mortiers avec MK. Avec l'inclusion de 10% et 15% de MK dans les mortiers, on a constaté des valeurs inférieures aux limites prescrites (0,1%). Tendit que la série de 5% de MK donne une expansion plus élevée et sa valeur dépasse la limite, de RAS après 28 jours dans le mélange qui contient 50% de GV. La diminution d'expansion pourrait être due à la réaction pouzzolanique de MK, qui consomme le  $\text{SiO}_2$  et  $\text{CaO}$  dans la réaction d'hydratation. Ces constatations impliquent que l'ajout de MK a entièrement minimisé l'effet négatif du GV sur RAS. Cet effet précieux du MK semblait évident pour les mélanges contenant des quantités plus élevées de GV. Plusieurs études ont affirmé que le MK est le meilleur matériau pour réduire le phénomène de la RAS. Poon et al. [133] ont examiné l'effet du MK sur RAS d'un mortier architectural. Ils ont constaté que la RAS dépend de la quantité de silice réactive de GV et les alcalins de ciment. De plus, ils ont noté que l'utilisation de 10% MK a atténué l'expansion de RAS. Lee et al. [216], ont proposé une solution techniquement viable qui consiste à utiliser un mélange avec 20 à 50% de granulats de verre, et d'utiliser un ajout d'inhibiteur de RSA tel que le MK.

L'analyse par le MEB a été effectuée pour déterminer la microstructure détaillée des mortiers contenant 5MK+50GV et 10MK+50GV. Les images de mortiers durcis pendant 28 jours de durcissement sont présentées dans les figures IV.9 et IV.10. Concernant les mortiers avec (5MK+50GV), nous avons remarqué que l'échantillon présentait des quantités très importantes de gel et sont affectés par la RAS. Le gel occupe les vides et les interfaces ciment/verre, et se propage à travers la pâte de ciment ce qui développe une micro-fissuration considérable (figure IV.10)., on a remarqué pour la composition de (10MK+50GV), peu de vides à l'intérieure de mortiers, ce qui explique la formation faible des vides à l'intérieur de la matrice [251].

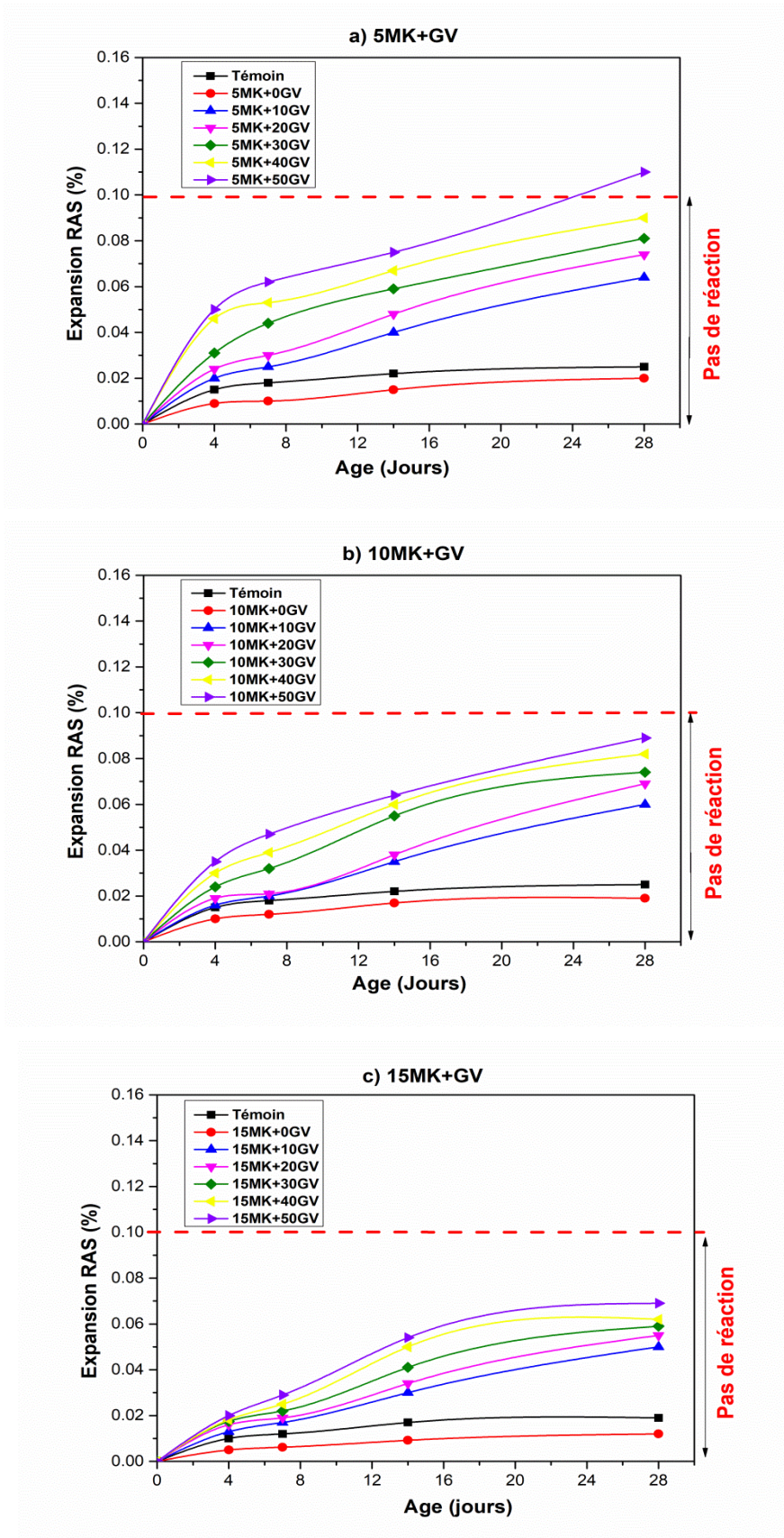


Figure IV.8. RAS pour les différents MAP.

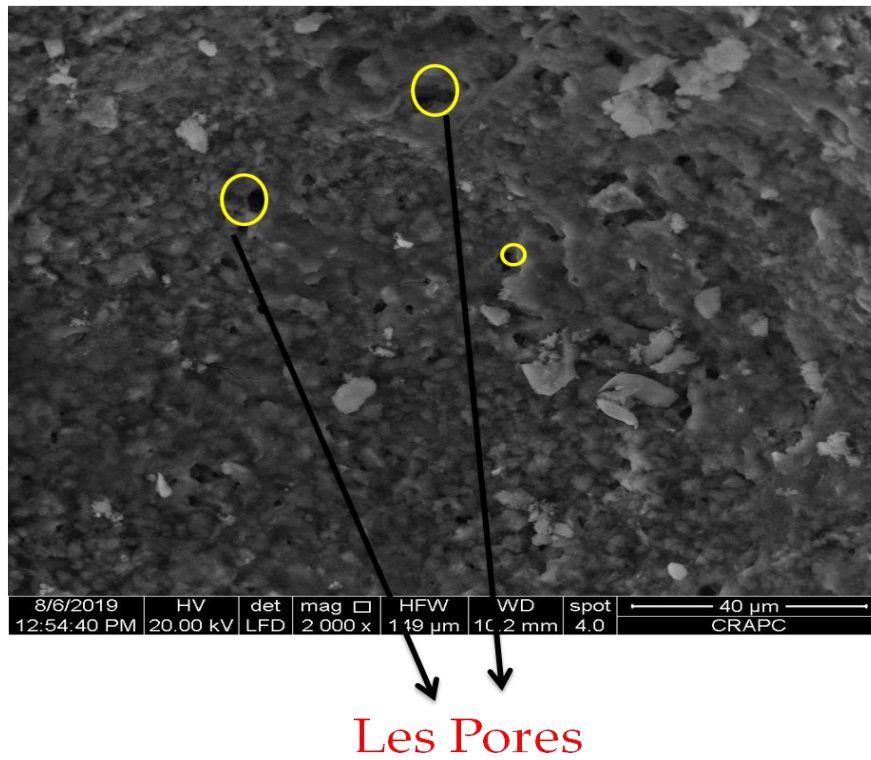


Figure IV.9. Examen au MEB pour le MAP à base 5MK+50GV à base après RAS.

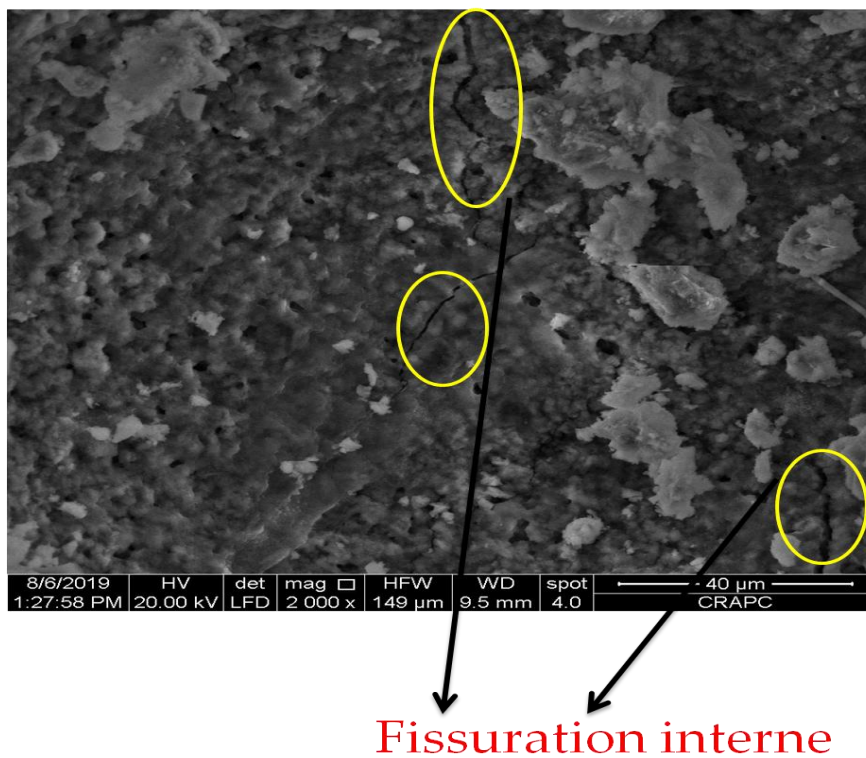


Figure IV.10. Examen au MEB pour le MAP à base 10MK+50GV à base après RAS.

### IV.2.5. Résistance à haute température

#### IV.2.5.1. Perte de résistance

La figure IV.11 (a, b et c) présente la variation de résistance à la compression résiduelle (RCR) des éprouvettes de MAP contenant différents pourcentages de GV et MK. La perte de résistance de tous les mélanges des MAP diminue à mesure que la température d'exposition augmente. Cette réduction est due à la déshydratation de l'ettringite, du gel C-S-H, des hydrates de calciques et de l'évaporation de l'eau des pores capillaires [252]. D'après les résultats obtenus, on peut observer que pour les MAP exposés à 600°C, l'augmentation de la quantité des GV a entraîné une diminution de la RCR. Pour les mortiers exposés à 800°C, la RCR a considérablement diminué plus que dans le cas d'exposition à 600°C. Un effondrement total a été observé pour des éprouvettes exposées à 1000°C. Cependant, la RCR de tous les MAP préparés avec les GV était supérieure à celle des échantillons avec 100% de sable, ce qui en déduit que les GV ont contribué à l'amélioration de la RCR. Les résultats concordaient bien avec celui des études précédentes [253, 254]. Ces études ont attribué à l'effet de remplissage des pores du verre fondu, dans la transition vitreuse de verre à 560°C au verre sodocalcique dans la matrice, ce qui donne une amélioration de la microstructure ainsi que la RCR. Ling et al. [255] 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.

Concernant l'ajout de MK dans les MAP, et d'après les résultats obtenus, on remarque que les mélanges nommés 5MK et 15MK présentent une RCR inférieure à celle du mélange témoin. L'ajout de 15% MK a augmenté la résistance à haute température du MAP mieux que 5% et 10% en raison de la microstructure dense et de la faible porosité du mélange avec 5% et 10% de MK [255]. Ce résultat confirme que 15% de MK avait une porosité élevée. Certains auteurs [256, 257], ont rapporté que l'introduction de MK dans la composition du béton avec un volume important peut avoir un effet négatif sur la résistance à haute température.

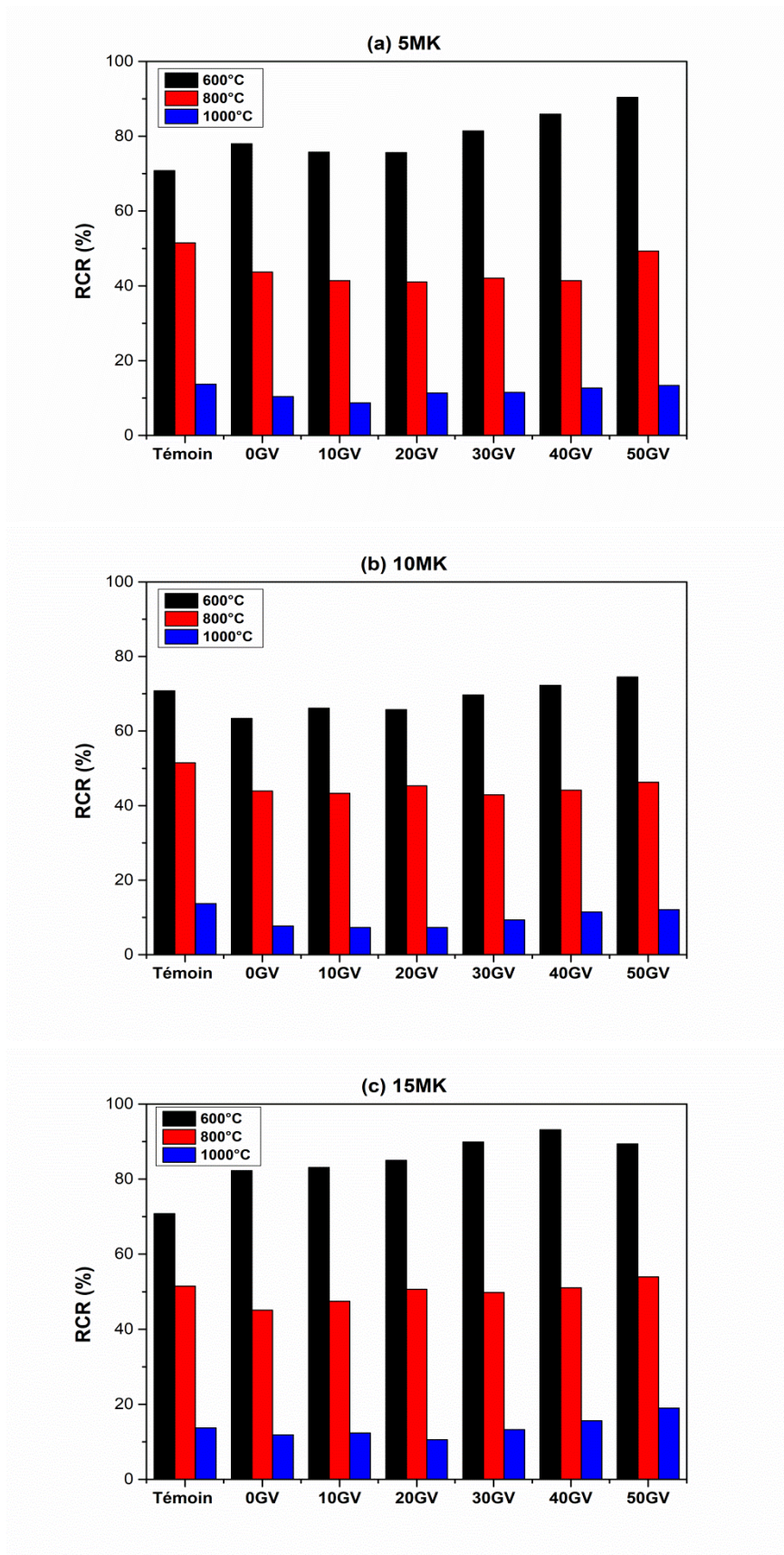


Figure IV.11. RCR pour les différents MAP.

Le processus peut être également due à la déshydroxylation du  $\text{Ca(OH)}_2$ , de la dissociation de  $\text{CaCO}_3$  en  $\text{CaO}$  et le  $\text{CO}_2$  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 [258]. 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 [259-261].

### IV.2.5.2. Perte de masse

La figure IV.12 montre les résultats de la variation de la masse des MAP avant et après exposition au chauffage. La figure IV.12 montre que quelle que soit la température donnée, la perte de masse de l'échantillon témoin était supérieure à celle des MAP avec GV et MK. Cet effet est peut être dû à un taux de sortie d'eau plus élevé dans le MAPT [262]. De plus c'était trouvé précédemment que l'absorption d'eau des MAP témoin (5%) était plus élevée que celle des MAP à base GV MK (0,88%). Cette perte de masse est attribuée à la décomposition d'autres composés par des processus tels que la décomposition ou la décarbonatation des portlandites [262]. Dans le cas d'exposition à  $800^\circ\text{C}$ , le al mélange composé de 10% de MK est celui qui présente la perte de masse la plus forte (9,5%) ; alors une perte de masse est enregistré d'environ 9% et 8% pour Les mélanges 5MK, 15MK respectivement .Lorsque les échantillons sont exposés à des températures plus élevées, la teneur en humidité des pores fins de la pâte de ciment et des granulats sera perdue, ainsi la structure de déshydratation du produit d'hydratation (C-S-H) était également un facteur de perte de poids.

## IV.3. ÉTUDE DES BETONS AUTOPLAÇANTS

### IV.3.1. Résistance à la compression

La figure IV.13 (a, b et c) montre la variation de la résistance à la compression des différents mélanges des BAP à 7, 28 et 90 jours. La figure montre une augmentation relative de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de MK. Au-delà de 15% du contenu en MK, il y a eu une perte de résistance à tous les âges de

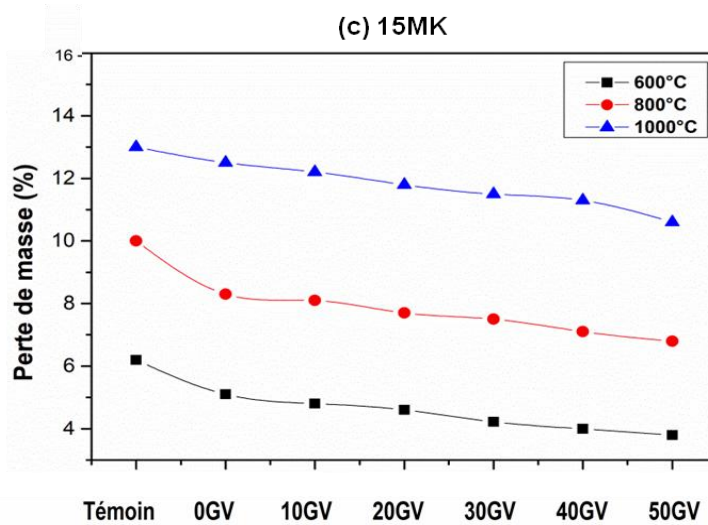
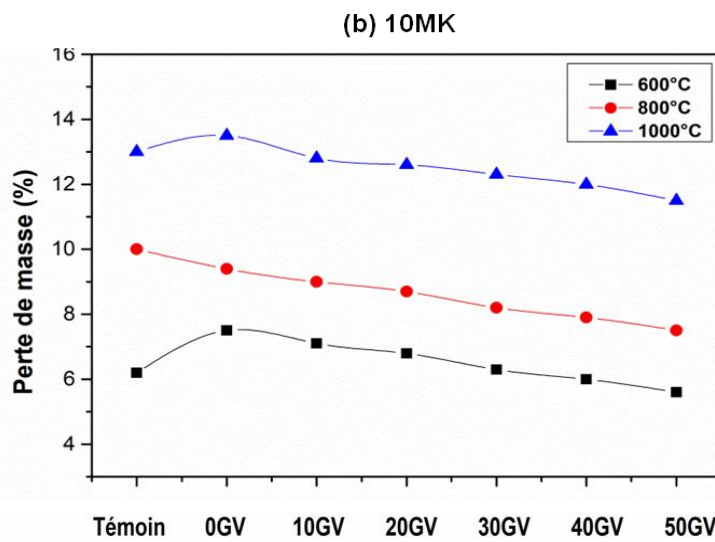
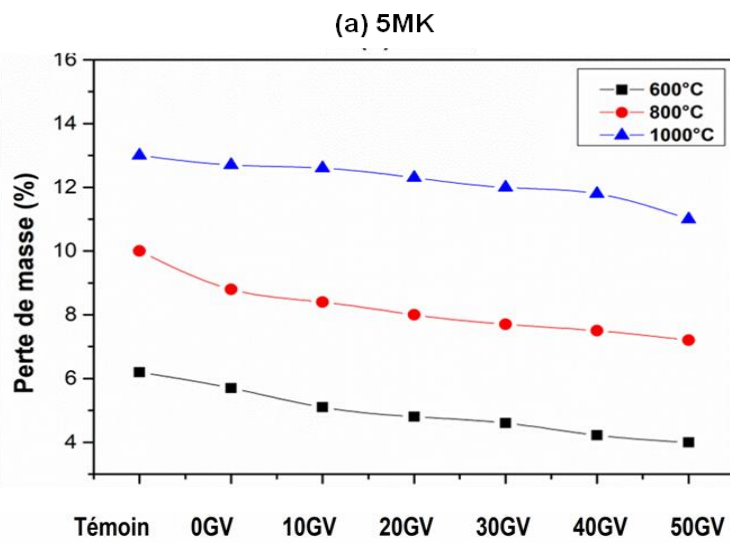


Figure IV.12. Perte de masse pour les différents MAP avant et après le feu.

durcissement par rapport à 5% et 10% du MK. La résistance à la compression de 7 jours du BAPT (GV0 + MK0) est de 30 MPa, ce qui augmente avec l'introduction de MK à 36 MPa. 38 MPa et 33 MPa pour les mélanges fabriqués avec 5%, 10% et 15% MK respectivement. D'après la figure IV.13, une évolution similaire de la résistance à la compression à 28 jours a été observée cela peut être dû à la progression de la réaction d'hydratation. De même, la résistance à la compression à 90 jours des mélanges de BAP augmente de 60 MPa à 74 MPa, 77 MPa et 72 MPa, ce qui représente une augmentation de 23%, 28% et 20% du taux de résistance par rapport au BAPT. Cette amélioration de la résistance avec l'introduction de MK à 90 jours s'explique par la réaction pouzzolanique avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à long terme [263, 264]. De Silva et Glasser [241] ont étudié l'hydratation des ciments à base de MK.

Les résultats ont montré que l'élimination du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et l'ajout de C-S-H par la réaction pouzzolanique sont les clés pour augmenter la résistance à la compression du béton. Les résultats ont indiqué aussi que la quantité optimale pour avoir une résistance maximale avec 10% de MK quel que soit l'âge de durcissement. En revanche, la réaction de MK a amélioré la résistance en raison de l'effet pouzzolanique et de remplissage dans les pores. Mais, l'augmentation du niveau de substitution au-delà de 10% réduira la résistance, cela peut être dû à l'effet de dilution du clinker où la quantité des produits de clinker dans le ciment diminue par le remplaçant élevé de MK [265]. Par conséquent, la teneur en portlandite dans le produit d'hydratation disponible pour la réaction pouzzolanique de MK diminue. Cela conduit à la formation d'une quantité moindre de gel CSH supplémentaire qui participe par la suite à la réduction de la résistance [266].

De plus, on remarque aussi sur la figure IV.13, que l'ajout de GV a diminué la résistance à la compression des BAP. Mais, la résistance reste toujours supérieure à celle du BAPT. Ceci s'explique par la réaction pouzzolanique du MK qui peut compenser la résistance à la compression à long terme. La résistance à la compression à 90 jours des mélanges de BAP passe de 60 MPa à 62,31 MPa, 69,31 MPa et 61,8 MPa pour les mélanges 5MK + 50GV, 10MK + 50GV et 15MK + 50GV, qui sont de 4%, 16% et 3% plus élevés que le mélange témoin (BAPT).

Ce développement de la résistance peut être dû à la présence de MK qui pénètre et remplit les pores, ce qui contribue à améliorer la ZTI entre les GV et la pâte de ciment [267].

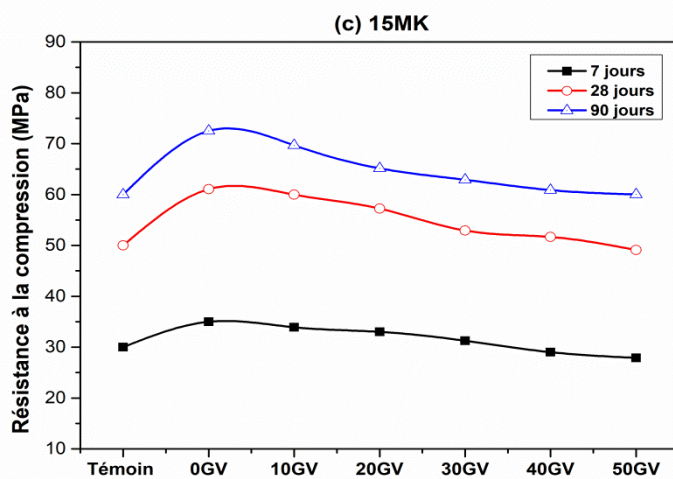
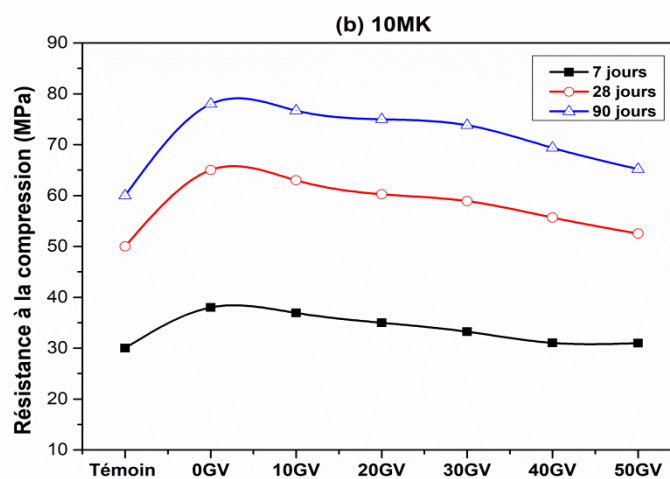
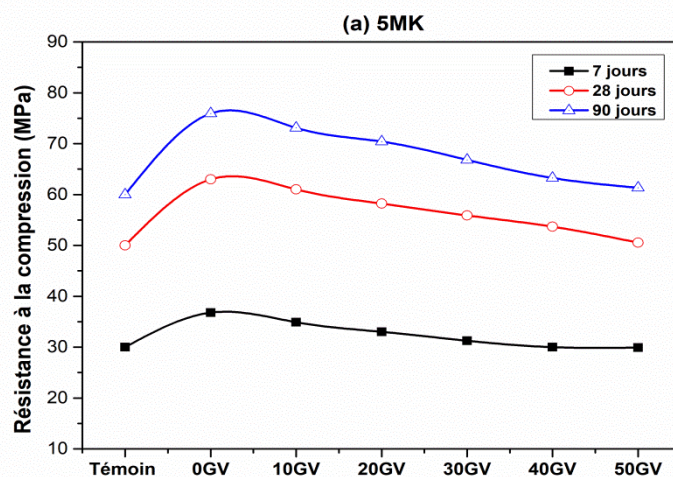


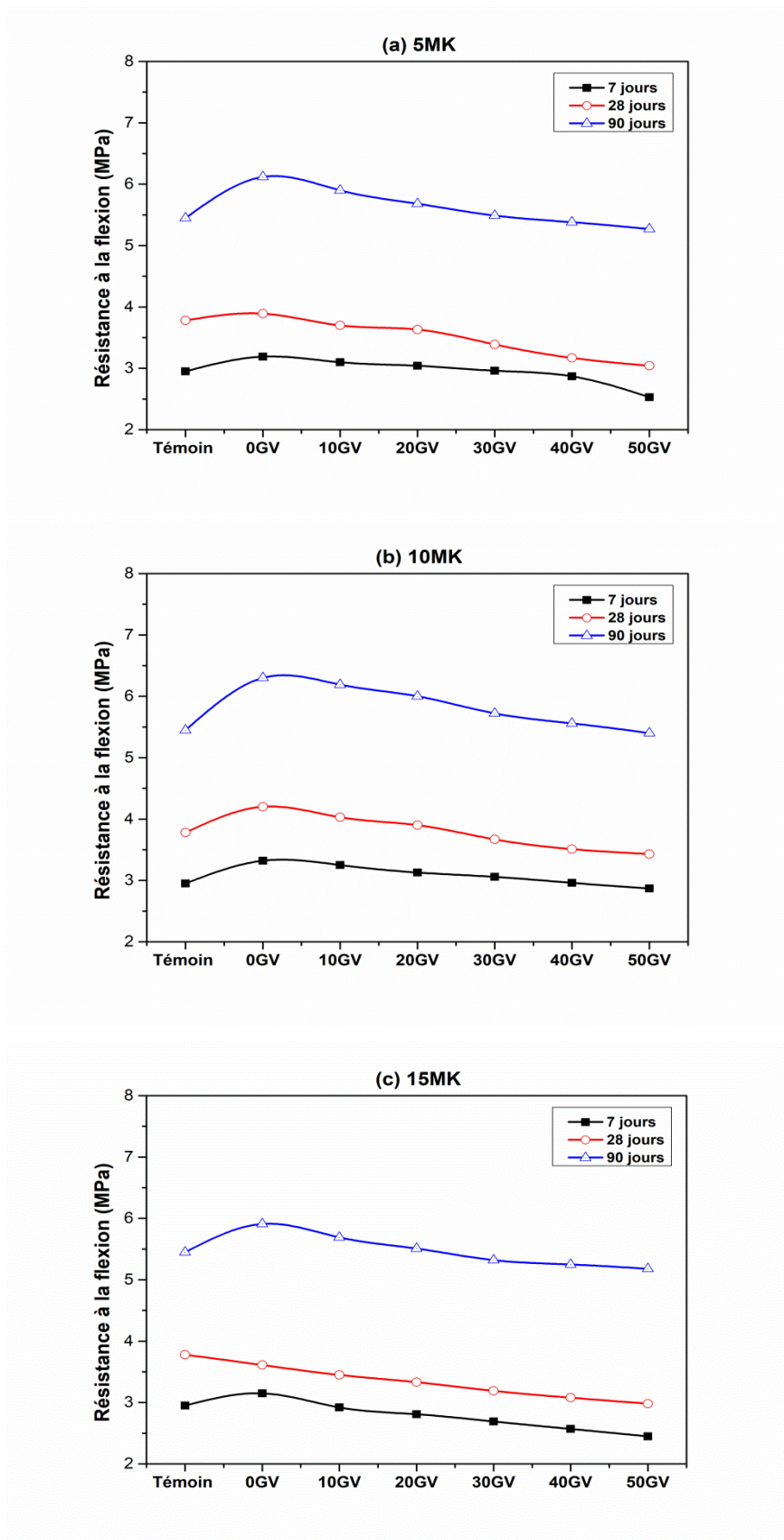
Figure IV.13. Résistance à la compression des différents BAP.

### IV.3.2. Résistance à la flexion

L'évolution de résistance à la flexion des différents BAP à 7, 28 et 90 jours est représentée sur la figure IV.14 (a, b et c). D'après ces figures, on constate que la résistance à la flexion des BAP diminue, lorsque le GV est incorporé aux mélanges surtout avec des taux élevés de remplacement (40 et 50%). La raison de la réduction de la résistance à la flexion du BAP avec les GV est la présence de mortier résiduel lâche et fissuré qui provoque une mauvaise adhérence entre les GV et la matrice de ciment, qui crée ainsi une zone faible à l'interface, où la défaillance se déclenche lorsque la charge est appliquée. Ce modèle de réduction de la résistance à la flexion est détecté dans plusieurs résultats antérieurs [268, 269]. Park et al. [108] ont trouvé que la substitution partielle (30%) du sable par les granules de verre dans la composition des bétons, à un effet comparable à celle des bétons de référence sur les résistances mécaniques. Au-delà de 30% de substitution du sable, les résistances diminuent.

De plus, il est illustré sur la figure IV.14 que la dégradation de la résistance à la flexion pour les mélanges de BAPGV pourrait être atténuée par l'incorporation de MK dans le béton. La résistance à la flexion avec la présence de MK sans GV augmente avec l'augmentation des quantités de MK. La résistance à la flexion à l'âge de 90 jours du mélange témoin (BAPT) est de 5.45 MPa, ce qui était augmentée à 6.1 MPa, 6.3 MPa et 5.9 MPa, pour l'incorporation de MK au taux de 5%, 10% et 15% respectivement. L'étude menée par Kim et al. [270] sur l'effet de MK sur les comportements mécaniques des bétons. Ils ont montré une tendance similaire de développement de la force pour le même pourcentage de MK. L'incorporation de MK dans le béton améliore la liaison entre la pâte et les granulats ainsi que renforce ZTI qui à son tour améliore la résistance à la flexion.

Par exemple, les gains de résistance à la flexion de 11,8%, 15,6% et 9% sont observés respectivement, pour 5%, 10% et 15% de béton en MK, par rapport au BAPT. Alors que 2,1%, 3,3% et 1% des gains de résistance à la flexion sont détectés pour le béton avec 5+50GV, 10MK+50GV et 15MK+50GV respectivement. L'amélioration peut être interprétée par la présence de plus des vides dans le béton, qui est rempli par le gel CSH résultant de la réaction pouzzolanique du MK.



\*

Figure IV.14. Résistance à la flexion des différents BAP.

De plus, l'épaisseur de ZTI est réduite, augmentant ainsi le taux d'amélioration de la résistance [271]. Une autre constatation notable sur les résultats de résistance à la flexion est que la résistance à la flexion la plus élevée est produite lorsque 10% de MK a été ajouté au mélange.

### IV.3.3. Vitesse d'auscultation sonique

La figure IV.15 (a, b et c) illustre l'effet du MK et GV sur le test de la vitesse d'auscultation sonique (VAS) effectué après un durcissement de 7, 28 et 90 jours. Les résultats du test montrent que les valeurs de VAS diminuent à mesure que le pourcentage de GV augmente. Une réduction des valeurs de VAS est observée pour la substitution de GV par 30% et 50%. Étant donné que les valeurs de VAS dépendent de la densité, de l'homogénéité, des vides et des fissures dans le béton, la présence de mortier résiduel sur la surface de GV augmente le système des pores, diminue la densité et perturbe l'homogénéité, offrant ainsi une plus grande longueur de chemin pour le déplacement des ondes ultrasonores, ce qui en conséquence réduit la vitesse d'impulsion. La réduction de VAS avec le pourcentage de GV est également observée dans les littératures précédentes [272, 273].

Cependant, l'utilisation du MK offrant un chemin bénéfique pour augmenter les valeurs de VAS du BAP. Il est observé que les valeurs de VAS des mélanges sont supérieures à celles du BAPT de 4,2%, 6,3% et 2,1% pour les mélanges 5MK + 0GV, 10MK + 0GV et 15MK + 0GV respectivement. Il est évident que le MK provoque une densification de la microstructure et un raffinement des pores dans la matrice de ciment et dans le ZTI. La capacité de remplissage des pores par MK et la génération de C-S-H supplémentaire dans les micro-fissures par la réaction pouzzolanique réduisent la porosité et améliorent finalement les valeurs de VAS [274]. La valeur de VAS plus élevée est enregistrée pour les mélanges avec 10% de MK. L'amélioration de VAS des mélanges de BAP à 10% de MK est également rapportée par kavitha et al., [275].

En ce qui concerne la combinaison de MK et GV dans les mélanges des BAP. on note un taux de développement de VAS de BAP avec 30% de GV qui de l'ordre de 1,31%, 2,1% et 1,27% avec l'ajout de MK à 5%, 10% et 15% respectivement par rapport au BAPT. De

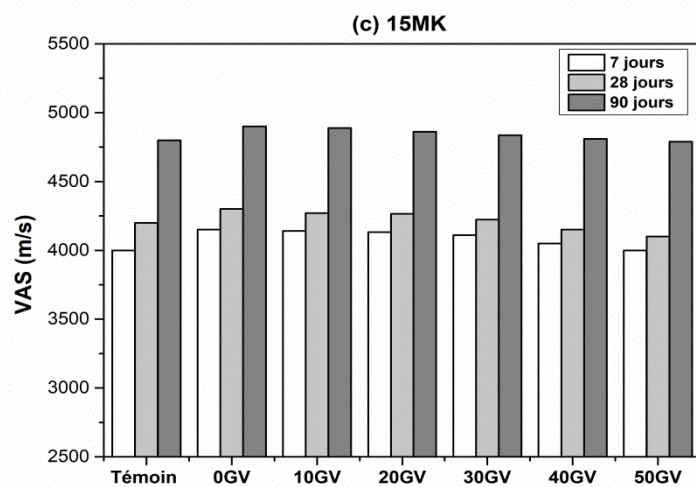
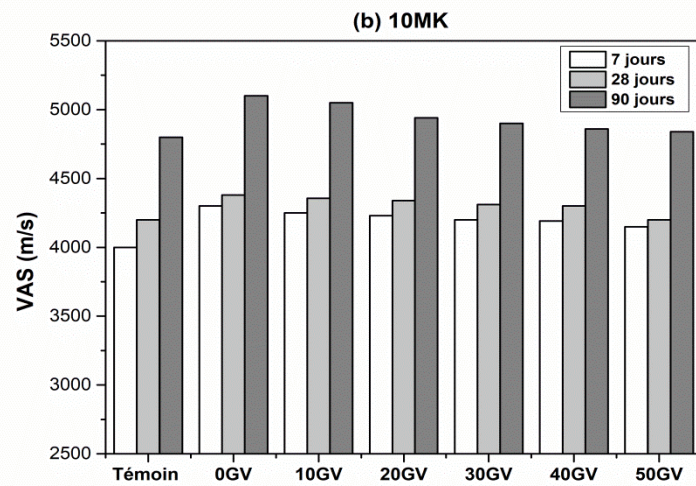
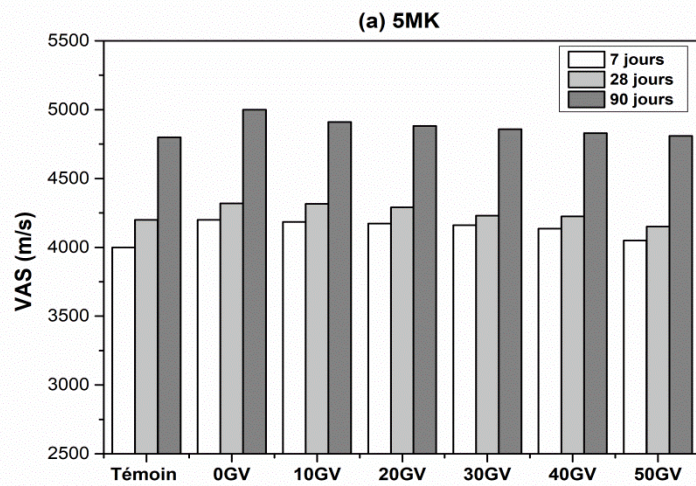


Figure IV.15. VAS des différents BAP.

même, pour 50% GV, des améliorations correspondantes des valeurs de VAS sont de 0,2%, 1,3%, et 0,17%. Cette amélioration est due à l'effet bénéfique de MK est. De plus, il peut être visualisé que les valeurs de VAS mesurées de tous les mélanges de béton varient de 4800 à 5100 m/s, ce qui est supérieur à 4500 m/s.

Par conséquent, les mélanges de béton sont classés de excellente qualité comme il est défini par la norme IS 13311 (partie 1) [276].

### IV.3.4. Porosité

L'influence du MK et GV sur le volume des vides de tous les mélanges de BAP sont déterminée à partir les résultats des essais de porosité est présente sur la figure IV.16. Il est déduit d'après de la figure IV.16, que le volume des vides augmente avec l'augmentation de GV. Pour le BAPT, le volume de vide est de 13,5%, l'amélioration est de 20,9% et 38,1% pour les mélanges de béton préparés avec 30% et 50% de GV respectivement. Comme expliqué dans la section précédente, le volume plus élevé des vides pour les mélanges à base GV est la conséquence de faible adhérence entre la pâte et les GV, [277]. De manière générale, l'incorporation des GV affecte le volume total des pores dans les BAP, ce qui entraîne ainsi une porosité élevée et une structure poreuse, produisant également un réseau de pores plus complexe. Le volume des vides diminue considérablement grâce à l'incorporation de MK dans le béton (MK+0GV). Il ressort de la figure IV.16 que, l'inclusion de 5%, 10% et 15% de MK dans le mélange de BAP diminue le volume des vides de 13,5% 7, 4% et 11% respectivement, par rapport au mélange témoin.

De plus, l'ajout de MK aux mélanges de BAP semble avoir un effet plus important sur la réduction du volume des vides. Pour les mélanges BAP contenant 30% de GV et 5-15% de MK, le volume des vides passe de 13,5% à 11%, 9,5%, et 12,54% respectivement. De même, le volume des vides de béton avec 50% GV et 5-15% MK diminue de 13,5% à 12,4%, 11,52% et 13,1% respectivement. Comme l'absorption d'eau, le volume des vides des mélanges de béton montre une réduction optimale avec 15% de MK. Cette réduction du volume des vides est due au remplissage des vides dans le béton par les particules plus fines de MK ainsi que les produits d'hydratation résultant de la réaction pouzzolanique [278]. Les images par la MEB des BAP 5MK+50GVGV, 10MK+50GVet 15MK+50GV, à 90

jours dans différentes conditions ont été obtenues et sont présentées sur les figures IV.17, IV.18 et IV.19. On peut voir que les mélanges avec 5MK + 50GV, 10MK + 50GV ont une structure uniforme et plus dense entre la pâte et les granulats. Le mélange 15MK + 50GV présente des pores et des fissures multiples (interconnectés et aveugles), ce qui peut affecter négativement la cohésion entre la matrice et les granulats.

Comme il est indiqué dans les images, le rayon des pores est de 89.60  $\mu\text{m}$ , 81.89  $\mu\text{m}$  et 95.82  $\mu\text{m}$  pour les mélanges 5MK+50GV, 10MK+50GV et 15MK+50GV respectivement. Cela peut être lié à la réaction pouzzolanique très efficace générée par le MK. Par conséquent, ce réseau étroit de produits d'hydratation a été produit avec des résidus mineurs de CH, ce qui expliquerait la réaction pouzzolanique entre MK et CH qui contribue à affiner la porosité capillaire du liant. Ces résultats sont en bon accord avec l'étude de porosité [242].

À des niveaux élevés de substitution du ciment par 15% MK, certains pores étaient plus grands parce que le taux de réactions pouzzolaniques consommait toute la portlandite, et certains MK seraient présents dans les mélanges de béton comme matériau inerte en l'absence d'hydrate de CH, et ne contribuera pas à la production de nouveaux hydrates de CSH. Selon Sellevold [279] cité par Djerbi [280], la réduction prononcée de la taille des pores dans les bétons avec fumée de silice est attribuable à deux caractéristiques de cet ajout minéral. Premièrement, sa haute réactivité pouzzolanique permet de se développer plus rapidement un réseau de pores discontinu. Deuxièmement, les particules de silice agissent comme des sites de nucléation pour le C-S-H, permettant ainsi une meilleure distribution spatiale des hydrates.

[281], ont remarqué que la taille moyenne des pores diminue de manière significative avec une teneur en MK allant de 15% à 45%, malgré qu'une augmentation de la porosité totale a été enregistrée avec des quantités élevées. L'incorporation des quantités de MK induit une population de taille de pore notamment plus fine. La taille des molécules des ions chlorure est de (36.6 nm), est plus grande que la taille des molécules d'azote (N<sub>2</sub>) qui est de (0.364 nm) [282], ce qui permet au gaz de passer facilement à travers les structures des pores, alors que les ions chlorure ne peuvent pas les traverser facilement, notamment en raison du phénomène d'absorption et les réactions chimiques [283].

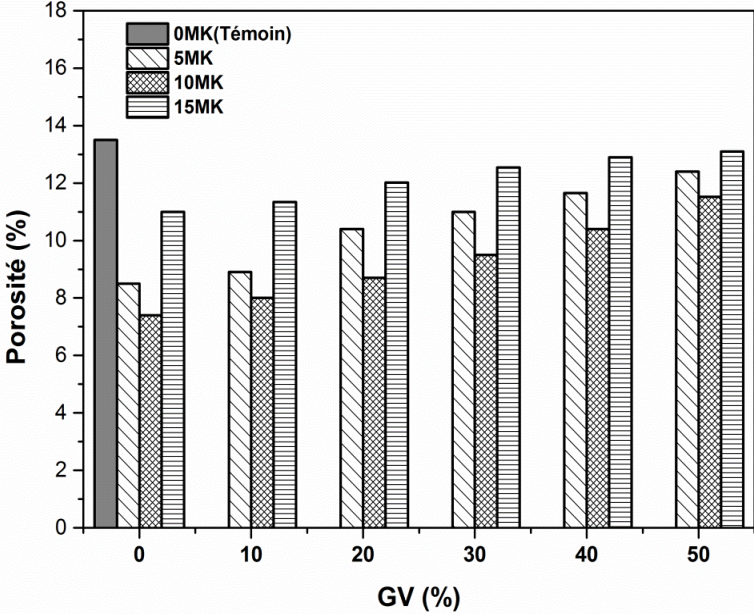


Figure IV.16: Porosité des différents BAP.

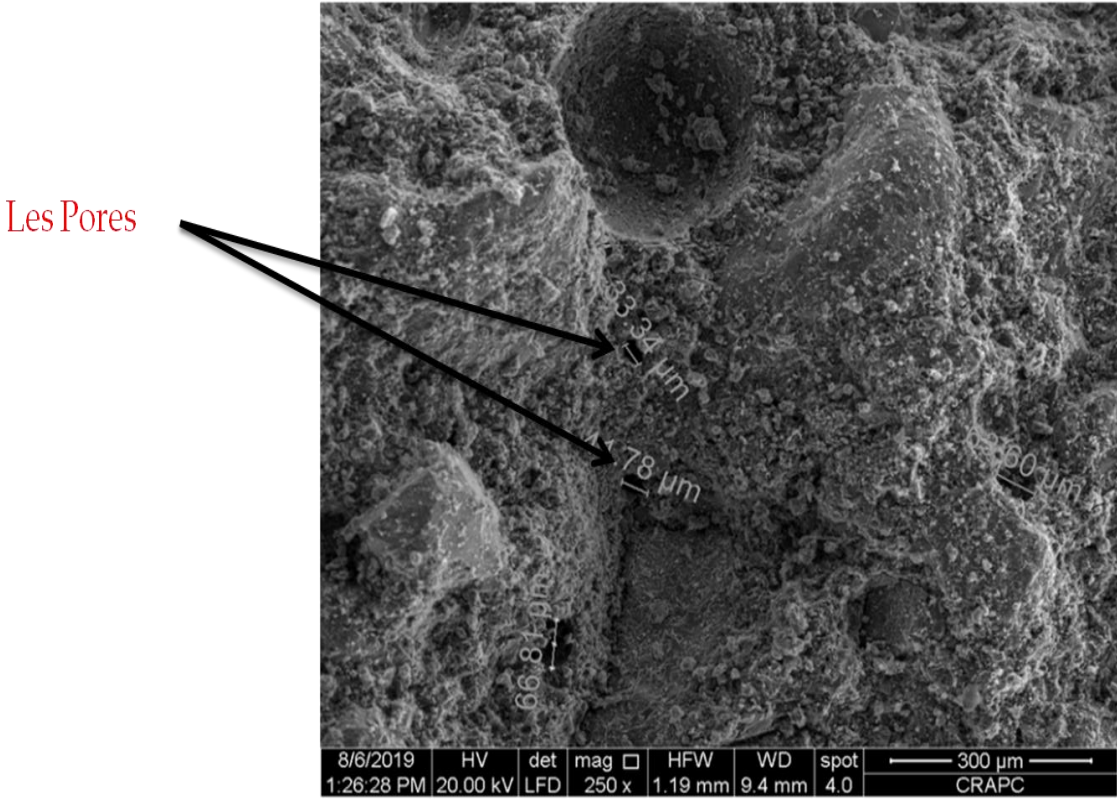


Figure IV.17. Examen au MEB pour le MAP à base 5MK+50GV.

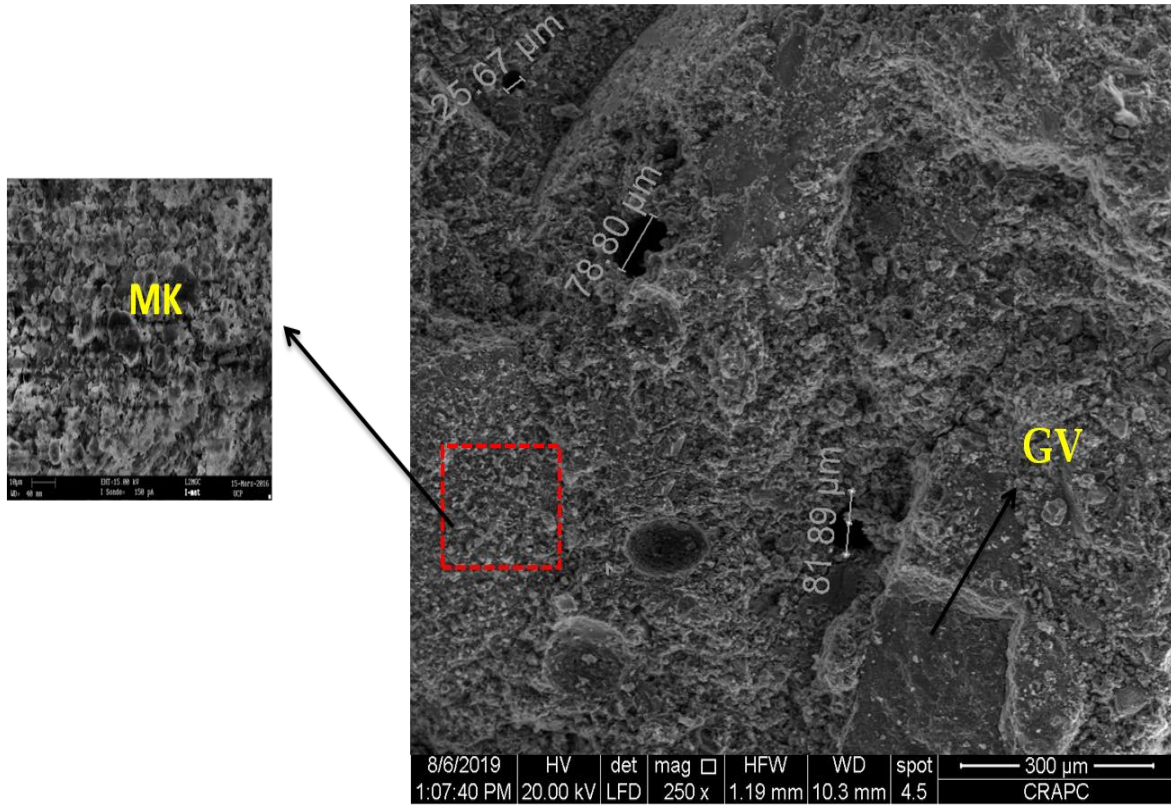


Figure IV.18. Examen au MEB pour le MAP à base 10MK+50GV.

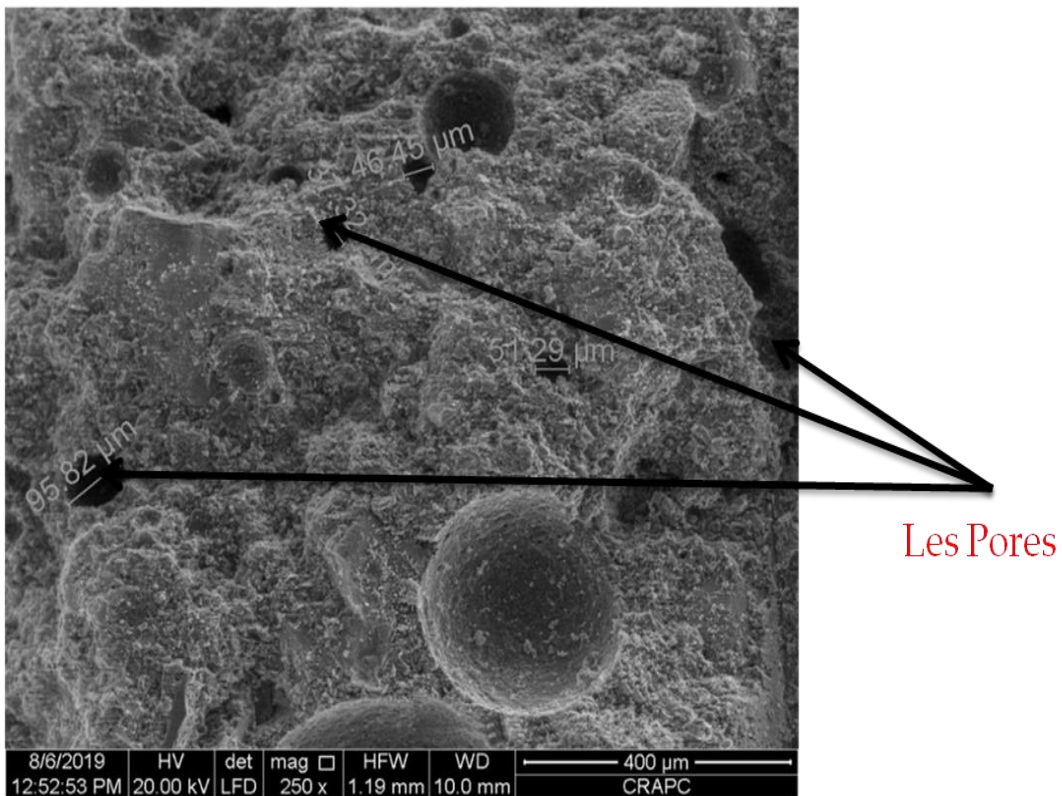


Figure IV.19. Examen au MEB pour le MAP à base 15MK+50GV.

### IV.3.5. Perméabilité à gaz

La perméabilité à gaz est une propriété de transfert qui donne un bon indicateur de la durabilité du béton. La perméabilité dépend de nombreux facteurs tels que; la nature du gaz, le type de matériau et sa porosité. Les résultats du coefficient de perméabilité apparente  $K_{app}$  obtenus sont représentés sur la figure IV.20. Les résultats obtenus ont clairement montré que le pourcentage de substitution du sable par un faible pourcentage de GV à un taux de 10%, se comporte différemment par rapport à un taux élevé 50%. Pour tous les mélanges de BAP, les valeurs du coefficient de perméabilité à gaz se situent dans la plage de ( $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ) à ( $5,55 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ). Ces résultats étaient également conformes à ceux de la porosité.

De façon générale, l'allure de la variation de la perméabilité au gaz en fonction des pourcentages des GV, montre l'existence d'un maximum aux alentours de 50%, mais toujours reste inférieure à celui de témoin, ce qui pourrait être expliqué par le fait d'interface pâte-granulat, qui se traduit par une zone de pâte particulière appelée « auréole de transition ». Cette auréole gouverne la qualité de l'adhérence entre la pâte, et les GV, et par conséquent la résistance de leur liaison. La porosité importante que présente cette zone par rapport au reste de la pâte devient un chemin privilégié pour le transport de gaz.

La figure IV.18 indique que, l'incorporation de MK diminue les valeurs de coefficient de perméabilité. La figure montre clairement que le coefficient de perméabilité du BAPT passe de  $5,5 \times 10^{-17}$  à  $3 \times 10^{-17}$ ,  $2 \times 10^{-17}$  et  $3,5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  avec l'ajout de MK au taux de 5%, 10% et 15%, respectivement. De même, pour les mélanges BAPMKGV avec 30% de GV et 5-15% de MK, la valeur de perméabilité passe de  $5,55 \times 10^{-17}$  à  $4,1 \times 10^{-17}$ ,  $3,4 \times 10^{-17}$  et  $4,7 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  respectivement. De plus, le coefficient de perméabilité d'un mélange avec 50% GV et (5-15%) de MK passe de  $5,55 \times 10^{-17}$  à  $5 \times 10^{-17}$ ,  $4,1 \times 10^{-17}$  et  $5,3 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  respectivement. Les résultats ci-dessus, avec des coefficients de perméabilités plus faibles associés à l'incorporation de MK, sont en accord avec les travaux de recherche précédents [47, 284]. Cela indique que l'inclusion de MK est plus efficace pour réduire la perméabilité qui peut être expliquée par les produits d'hydratation résultant de pouzzolanique réaction

[285]. De plus, la grande finesse de MK (7000 cm<sup>2</sup>/g) réduit la taille des pores en raison de l'effet de remplissage, qui a également réduit la perméabilité du mélange.

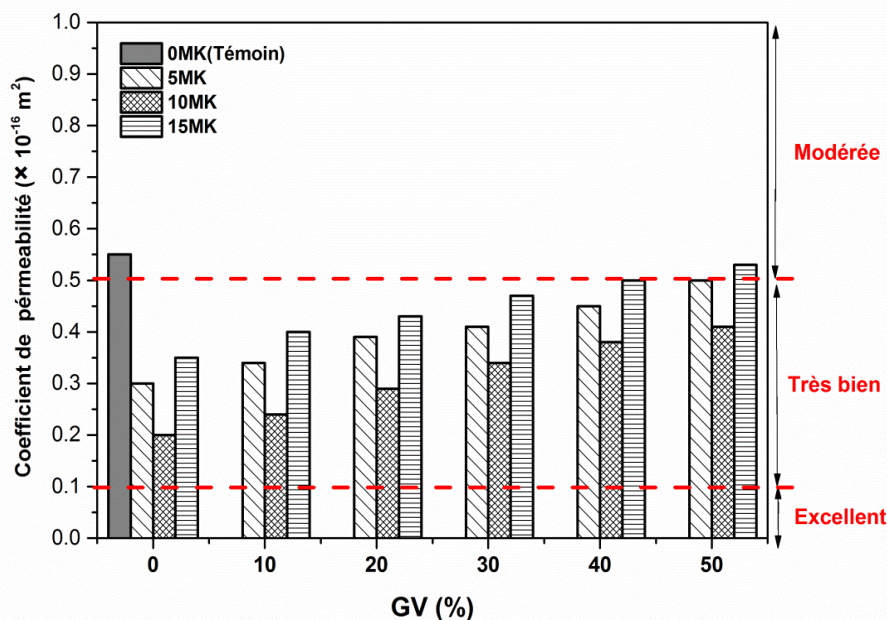


Figure IV.20. Perméabilité à gaz des différents BAP.

Selon Young [286], la diminution prononcée de la perméabilité à gaz en présence de MK est surtout remarquable pour des rapports eau/ciment élevés, probablement à cause du phénomène de la meilleure répartition spatiale des hydrates. Selon sun et al. [287] le MK provoque aussi une amélioration à l'interface pâte-granulats, entre autres en augmentant la résistance à la fissuration de cette zone particulièrement sensible, conduisant ainsi à une diminution de la perméabilité. D'après la figure IV.20 on remarque que jusqu'à 50% de remplacement le sable naturel par le GV et 5-10% de MK comme ajout cimentaire, les valeurs de la perméabilité au gaz restent dans la gamme très bonne classe, à propos de la classe qualitative de résistance à la perméabilité au gaz de béton [288].

### IV.3.6. Pénétration aux ions chlorures

La résistance à la pénétration du chlorure des mélanges de BAP était effectuée, selon la norme C1202, et les résultats en termes de charge électrique totale (en Coulombs) passée à travers les éprouvettes cylindriques de béton à l'âge de 90 jours sont représentés sur la

figure IV.21. D'après cette figure, on remarque que pour tous les mélanges de BAP, les valeurs enregistrées se situent entre 1500 et 2200 C, qui pourraient être classés dans la zone très bonne selon la norme ASTM C1202 [207].

La figure montre que, le remplacement du sable naturel par les GV entraîne une augmentation considérable de la pénétration du chlorure. Le mélange témoin (BAPT) présente une profondeur de pénétration plus élevée par rapport aux d'autres mélanges (2200 C). On voit aussi que par rapport le BAPT, la profondeur de pénétration du chlorure de mélanges contenant 40 % et 50% de GV à un effet élevé sur la pénétration des ions chlorure. Cela peut être dû au fait que le GV est relativement plus perméable que le sable naturel. Ces pores permettent la diffusion progressive des ions chlorures facilement dans le béton, ce qui augmente finalement la profondeur de pénétration du chlorure [289, 290].

L'effet positif de l'utilisation de MK dans les mélanges de BAP est clairement visible sur la figure IV.21. Une amélioration nette de la résistance à la pénétration des chlorures des mélanges de BAP a été observée en raison d'une augmentation du pourcentage de MK. Les mélanges de béton contenant 5 à 15% de MK et 30% de GV montrent une réduction de la profondeur de pénétration du chlorure jusqu'à un maximum de 40%. La plus forte réduction étant observée pour le groupe de 10% MK. Kavitha et al. [291] ont rapporté que l'utilisation de 10% de MK avait un effet positif sur l'amélioration de la pénétration des chlorures dans le BAP.

De plus, le même résultat rapporté par Navdeep et al [292]. Concernant l'effet positif de l'inclusion de MK pour réduire la pénétration des ions chlorure. Un autre résultat a été obtenu par Kou et al, qui ont mentionné que l'utilisation de MK à un taux de remplacement relativement élevé au ciment augmente la vitesse de pénétration du chlorure dans le BAP.

Pour les mélanges de béton avec la même quantité de MK, mais avec 50% de GV, la réduction correspondante de la profondeur de pénétration du chlorure est rapportée à 39%. Les résultats suggèrent que, la meilleure performance de MK dans l'amélioration de la résistance à la pénétration du chlorure a été atteinte avec un pourcentage de remplacement de 10% de MK. Ce résultat peut être dû à la formation d'une plus grande quantité de gel CSH par le MK et sa finesse qui participe à la densification des pores, par conséquent

donne une microstructure imperméable, réduisant ainsi la profondeur de pénétration du chlorure [231].

L'utilisation d'une quantité plus élevée de MK (c'est-à-dire 15%) n'est pas toujours bénéfique pour améliorer la résistance à la pénétration des chlorures, en raison de l'effet de dilution du clinker.

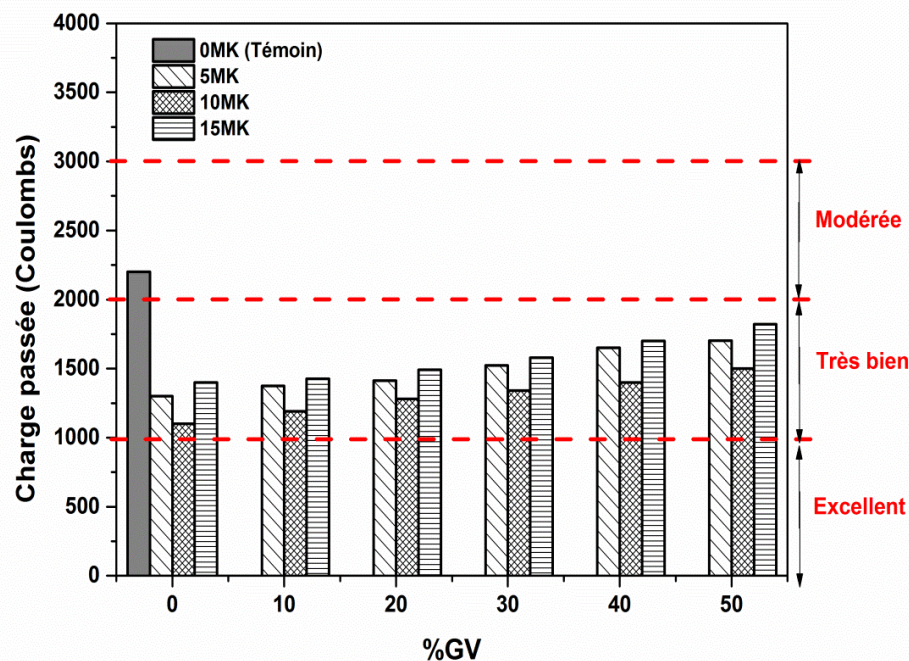


Figure IV.21. Pénétration des ions chlorures.

Selon Peem et al. [293] la création d'une réaction pouzzolanique entre le MK et l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH}_2)$  provoque la formation de gel C-S-H qui peut donner des bétons moins poreux, et certains ions chlorure sont absorbés sur la surface du gel CASAH.

La limitation présentée par les spécifications AASHTO T-277 [294] est indiquée sur la figure IV.21. Cette classification montre que tous les mélanges de SCC étudiés à l'exception du BAP témoin se sont révélés être dans la catégorie de «faible perméabilité aux chlorures».

### IV.3.7. Résistance à la ségrégation statique

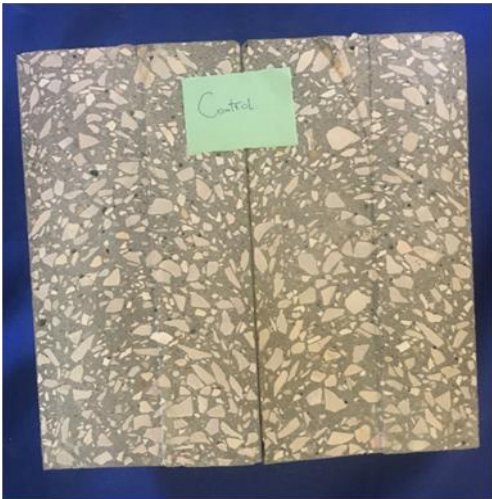
La figure IV.22 montre un examen visuel de la ségrégation statique des éprouvettes cylindriques coupées en deux morceaux. On peut remarquer à partir de cette figure que le mélange de béton témoin (BAPT), comporte un grand nombre des granulats et moins granulats sont séparés de la pâte de ciment. Cela signifie que la défaillance se produit principalement en raison de la rupture de granulats plutôt que de la défaillance de ZTI.

Cependant, pour les échantillons à base de MK sans GV présentent une distribution régulière et homogène des grosses particules dans toutes les parties de l'éprouvette et à tous les niveaux, ce qui permet de conclure que ces mélanges ont des bonnes résistances à la ségrégation statique. Le mélange avec 10% MK sélectionné visuellement comme le mélange le plus homogène.

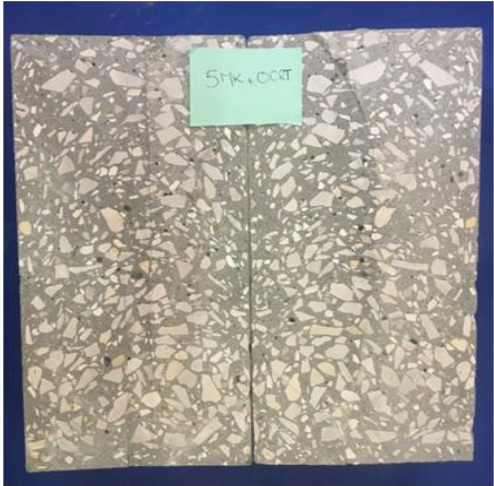
En outre, pour le béton contenant 50% de GV, on observe que, la plupart des granulats sortent de la pâte de ciment, ce qui indique que la rupture de ZTI plus faible entre la pâte de ciment et le GV. De plus la différence entre la ZTI de l'ancien mortier (BAPT) et le nouveau mortier avec GV est la plus faible de ce dernier en raison de la nature poreuse et moins compacte et donc plus sujette à la défaillance, et par la suite provoquant la ségrégation entre les granulats et la matrice de ciment.

D'un autre côté, lorsque le MK est incorporé dans les mélanges de BAPT avec GV recyclé (BAP30-10 et BAP50-10), les propriétés de ZTI sont améliorées et le modèle de ségrégation devient similaire au béton de contrôle. Cela montre la preuve de l'amélioration de ZTI et de la liaison dans les mélanges de GV mélangés au MK conduisant à l'amélioration de la résistance à la ségrégation et les propriétés du béton en général.

Muduli et al [239] ont évalué les performances de ségrégation statique du béton incorporant des granulats recyclés et le MK comme ajout cimentaire. Ils ont examiné que l'incorporation de MK a amélioré le mode de rupture de la ségrégation.



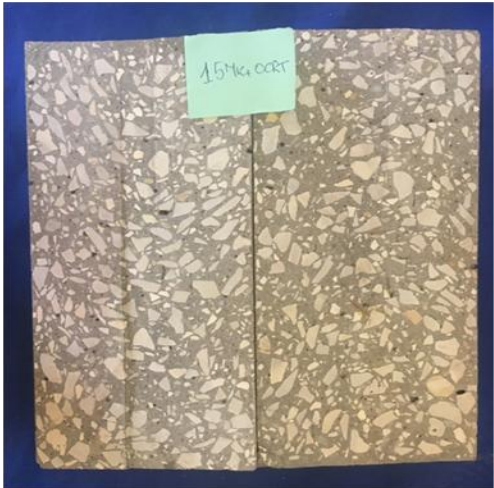
Témoin



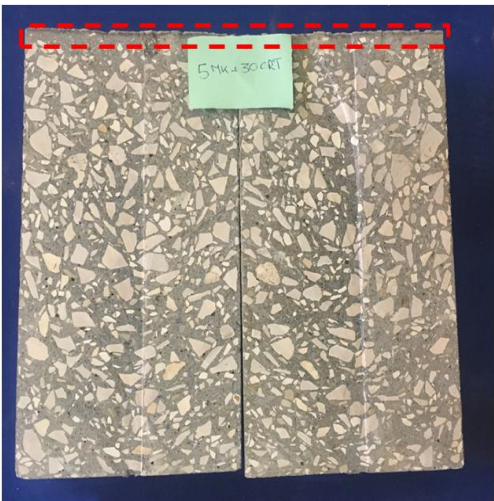
5MK+0GV



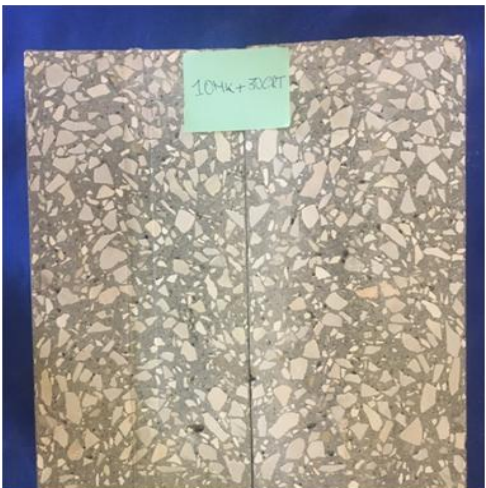
10MK+0GV



15MK+0GV



5MK+30GV



10MK+30GV

Figure IV.22. Examen visuel de la ségrégation statique des différents BAP(a).

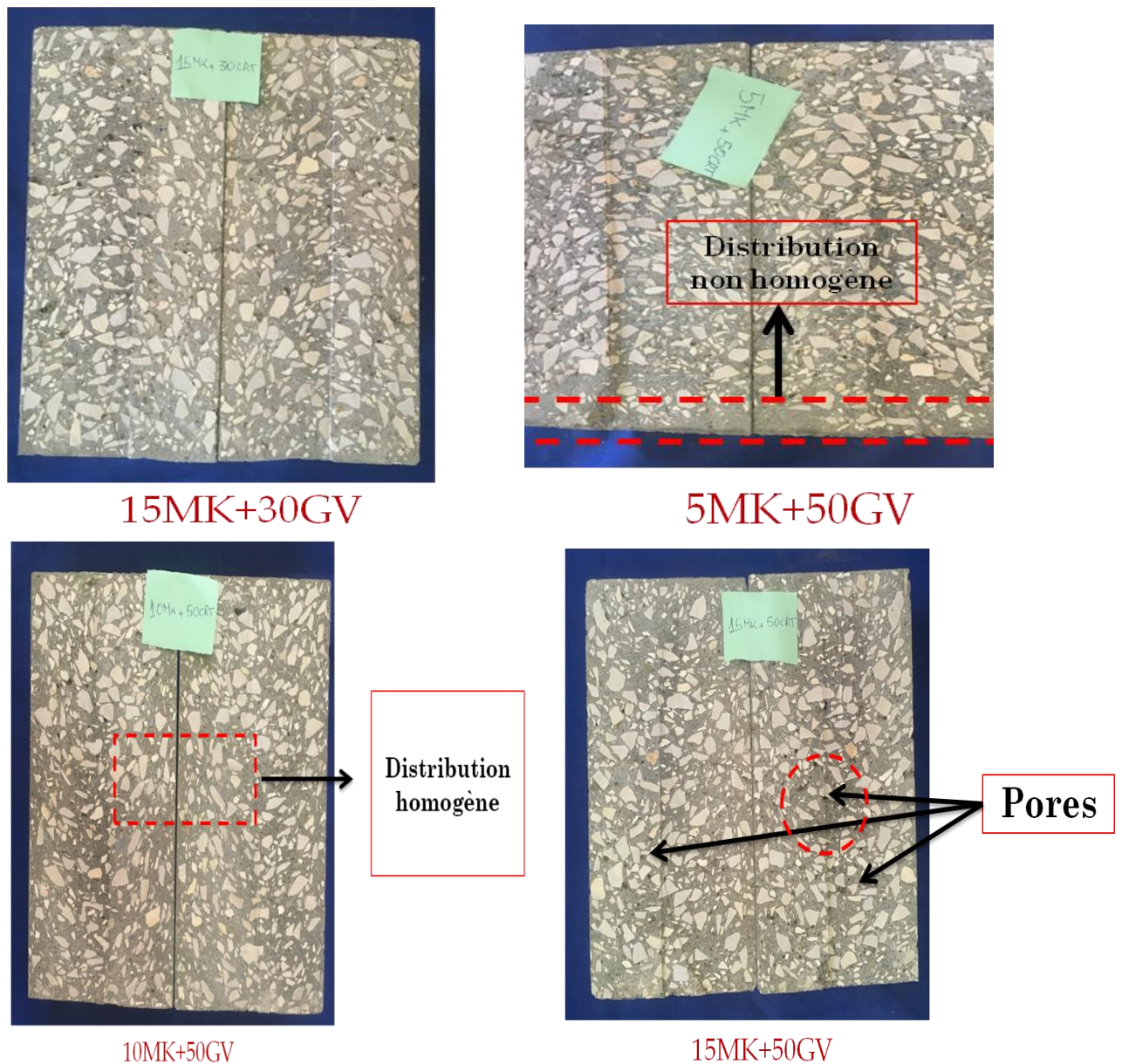


Figure IV.22. Examen visuel de la ségrégation statique des différents BAP (b).

#### IV.4. CORRELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DU BETON AUTOPLAÇANT

Plusieurs chercheurs sont en accord sur l'existence des relations ou modèles mathématiques entre les caractéristiques des bétons à l'état durci. Les résultats du BAP à l'état durci sont corrélés entre eux afin de mieux analyser le comportement du matériau, et aussi pour analyser les liens entre les différentes caractéristiques de ce matériau.

#### IV.4.1. Corrélation entre la résistance à la compression et VAS

La VAS permet d'évaluer non seulement la qualité du béton (l'homogénéité, la présence des fissures et vides), mais de déterminer aussi la résistance à la compression d'une structure existante sans avoir recours à des essais qui peuvent affaiblir l'élément en béton tel que le carottage. Le meilleur modèle mathématique reliant la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique des bétons est de forme exponentielle.

$$RC = ae^{av} \quad \text{Eq :IV.1}$$

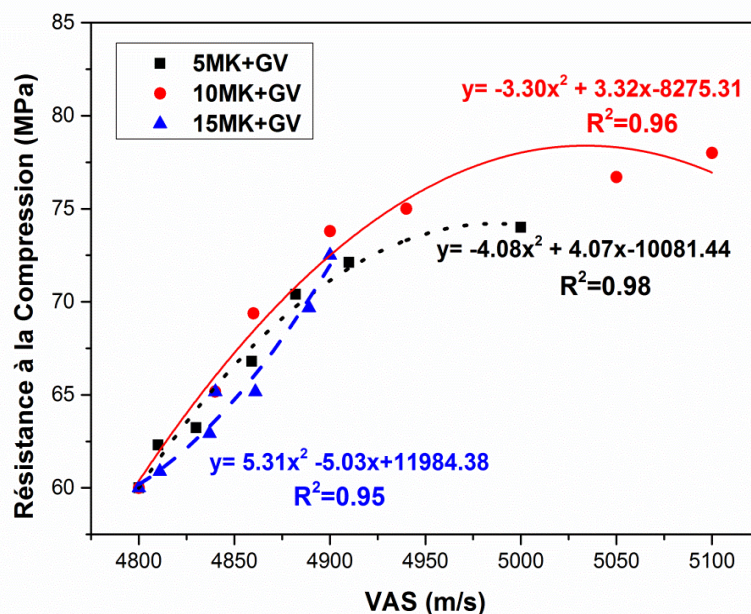


Figure IV.23. corrélation établie entre la résistance à la compression et VAS.

Cette relation suggère que, l'augmentation de la vitesse d'auscultation sonique ou dynamique conduit à l'accroissement de la résistance à la compression. Ulucan et al. [295] ont rapporté que le même modèle est approprié aux BAP élaborés avec des cendres volantes et de la fumée de silice. La plupart des formules empiriques reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels sont non linéaires. La figure IV.23 présente les courbes de corrélation établies entre les résistances à la compression et les vitesses d'auscultation sonique correspondantes à l'âge de 90 jours. D'après cette figure, on remarque une augmentation de la VAS associée à une augmentation de la résistance à la

compression. Une bonne corrélation linéaire pour toutes les séries ( $R^2 > 0,9$ ) est observée entre les deux propriétés.

#### IV.4.2. Corrélation entre résistance à la compression et la porosité

La porosité accessible à l'eau est exprimée en fonction de la résistance à la compression sur la Figure IV.24. Ces paramètres varient en fonction de la teneur de MK et t GV. La variation de la porosité avec la variation de la résistance à la compression est clairement linéaire (fonction affine) et s'accorde avec des investigations menées par. La valeur  $R^2 = 0,94$  montre une bonne corrélation entre la porosité et la résistance à la compression. Sur ce graphique, on peut voir que la relation n'est pas influencée de manière significative par l'utilisation de MK ou de GV. Les mélanges sans GV ou avec le MK semblent donner des résistances plus élevées pour une porosité donnée et les mélanges avec la combinaison de MK et GV donnent des résistances légèrement inférieures pour une porosité donnée. Ces différences ne sont cependant que faibles et on peut conclure que pour les résultats disponibles, le volume de GV utilisé n'influence pas significativement la relation résistance- porosité du béton.

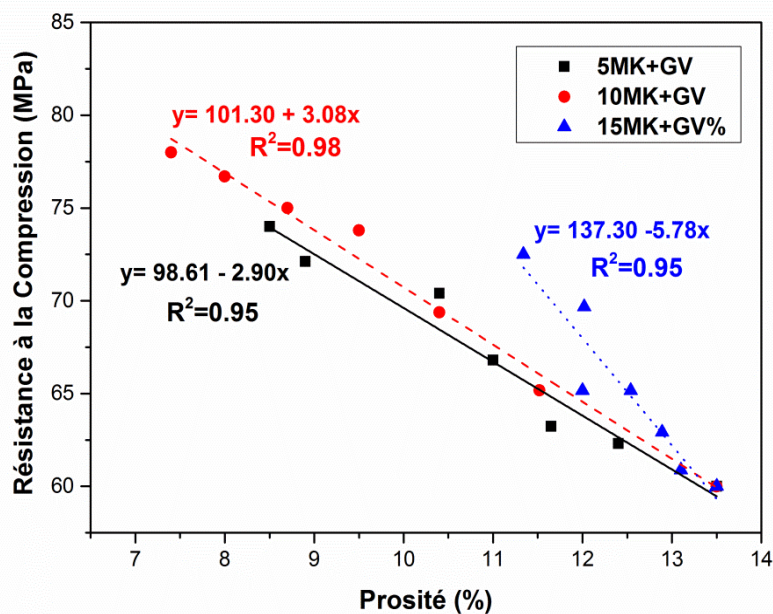


Figure IV.24. corrélation établie entre la résistance à la compression et la porosité.

#### IV.4.3. Corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration aux ions chlorures

La figure IV.25 illustre la relation entre la résistance à la compression et la charge totale passée à travers l'échantillon des BAP fabriqués avec les GV et le MK à l'âge de 90 jours. Une augmentation de la résistance à la compression est associée à une diminution de la charge totale passée. Une bonne corrélation linéaire est donc observée pour les séries de 5MK+GV et 10MK+GV avec  $R^2 = 0,82$  et  $R^2 = 0,77$  respectivement, tandis que la série présente un coefficient moyen de corrélation ( $R^2 = 0,55$ ). Cela peut être attribué aux différences de microstructure du béton préparé à l'aide de différents types de matériaux et de paramètres de conception du mélange. Ce résultat est en bonne concordance avec celui obtenu par [296]. De plus on a noté une tendance à la diminution de la profondeur de pénétration des ions avec l'augmentation de la résistance, mais la corrélation était faible pour la série 5 MK+GV. Ils en ont déduit que la profondeur de pénétration de chlorure dépend de la résistance à la compression, mais également de la structure des pores de la matrice de béton.

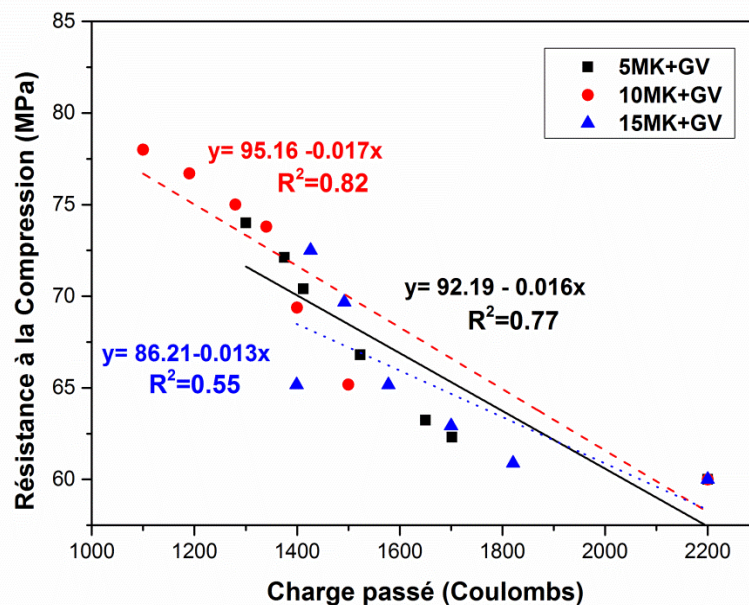


Figure IV.25. Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité aux ions chlorures.

En analysant les résultats de figure IV.25, on peut conclure que les corrélations entre la résistance à la compression et la vitesse la charge passée, sont plus affectées par la par la composition du béton ou le type de matériaux employés.

#### IV.4.4. Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité

La porosité totale en fonction la perméabilité aux ions chlorures des mélanges de BAP contenant des MK et GV sont illustrés à la figure IV.26. D'après cette figure, on remarque qu'il existe une bonne corrélation pour toutes les séries qui sont : ( $R^2 = 0,77-0,88$ ) du type linéaire. Cependant, la perméabilité aux ions chlorures a tendance à augmenter avec l'augmentation de la porosité totale.

Le faible coefficient de corrélation pour la série de 5MK+GV, car la diffusion des ions chlorures ne dépend pas seulement de la porosité totale, mais également de la tortuosité, de la surface spécifique, de la connectivité des pores et de leur distribution granulométrique à l'intérieur de la matrice.

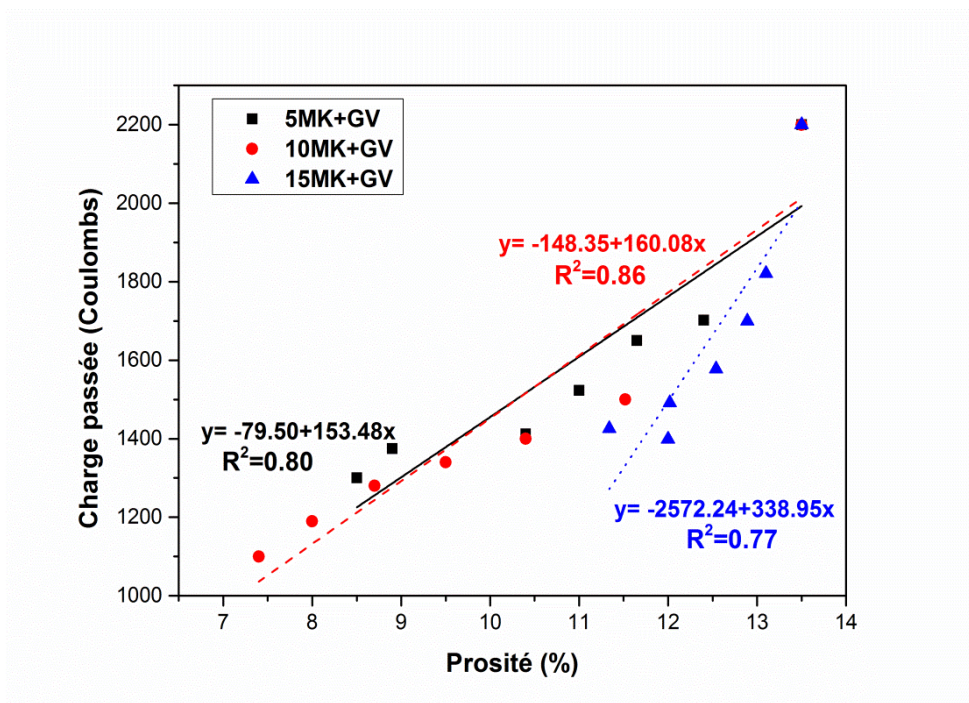


Figure IV.26. Corrélation entre la porosité et la perméabilité aux ions chlorures.

IV.4.5. Corrélation entre la perméabilité à gaz et la porosité

Les matériaux poreux ont une perméabilité très importante et vice-versa, mais ce n'est pas nécessairement toujours le cas, sachant que la distribution des vides ainsi que leur interconnectivité jouent un rôle très important dans cette équation. La perméabilité est l'aptitude d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un différentiel de potentiel. En général, ses deux propriétés sont positivement corrélées.

La figure IV.27 illustre, la relation entre la porosité et le coefficient de perméabilité aux gaz pour les différents types des BAP. À ce regard, on a trouvé des coefficients de corrélation acceptable qui varient entre 0,79 et 0,98 pour la porosité totale et le coefficient de perméabilité au gaz pour une fonction linéaire.

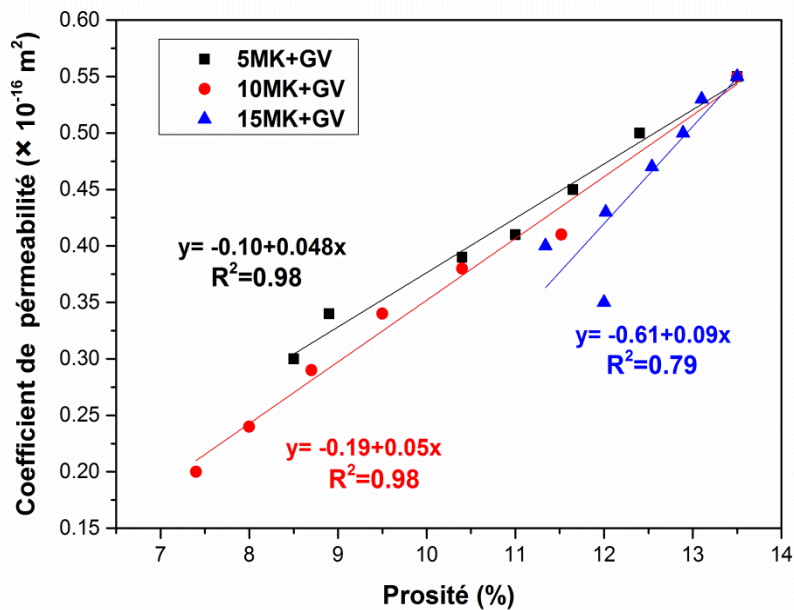


Figure IV.27. Corrélation entre la porosité et la perméabilité à gaze.

### IV.5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BAP

La production mondiale de ciment a augmenté très rapidement ces dernières années et, après les combustibles fossiles et le changement d'affectation des terres, c'est la troisième source d'émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Le ciment est un liant utilisé pour assembler des éléments entre eux, ce dernier représente 80 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> du béton, qui est son tour représente environ 6 à 7 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> de la planète Shi et al.[297]. Ceci est particulièrement grave dans le contexte actuel du changement climatique et s'aggrave encore parce que la demande de ciment est attendue augmenter de près de 200% d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 2010 atteignant 6000 millions tonnes/an [298].

En règle générale, le but de l'évaluation des impacts environnementaux (émission de CO<sub>2</sub> et l'énergie) menée de façon scientifique est de connaître les conséquences environnementales dans la phase préliminaire d'avant projet, avant son approbation. Une évaluation tardive pour des projets en cours de réalisation par exemple, en particulier lorsque l'estimation de leurs impacts montre qu'ils ne sont pas à la faveur du milieu dans lequel ils ont été implantés n'atteint pas ces objectifs. À cet effet, la prise en compte de l'impact environnemental représente une économie appréciable, surtout en ce qui concerne la mise en place de dispositifs correcteurs, de modification ou de compensation.

En résumé, on peut dire que cette l'évaluation de l'impact environnemental d'un projet, signifie l'estimation quantitative des différents changements positifs et négatifs, atteignant l'environnement suite à sa création. Cette évaluation prend en considération tous les effets et les impacts environnementaux des activités relatives au projet étudié, selon l'estimation de certains indicateurs d'évaluation, qui sont mentionnés dans les rapports finals. C'est ainsi que nous présentons de manière séparée ces indicateurs d'évaluation des impacts dans cette étude [299].

Selon cassagnabère et al. [300] la production de ciment libère plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère que la production de MK. L'extraction des matières premières et la calcination sont responsables des émissions de CO<sub>2</sub> de la production de MK (1t de MK produite = 175kg de CO<sub>2</sub>, mais pas de la réaction chimique (dihydroxylation). Cependant,

## CHAPITRE IV : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI

la production de ciment émet du CO<sub>2</sub> lors de la décarboxylation du carbonate de calcium (1t de ciment produit = 521,5 kg de CO<sub>2</sub>) et du processus d'extraction (1t de ciment produit = 478,5 kg de CO<sub>2</sub>). De plus, selon kavitah et al. [291], le MK nécessite moins d'énergie thermique lors de sa production (1t de MK produit = 2,95 GJ, par rapport au ciment (1t de ciment produit = 4,65 GJ). L'étude des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère et la consommation d'énergie ont été calculées par les équations suivant :

$$\frac{C_i - C_o}{C_o} \times 100 \quad \text{Eq :IV.2}$$

Avec :

C<sub>i</sub>: émission de CO<sub>2</sub> pour les mélanges des BAP mélangés avec le MK (i = MK5, MK10 et MK15) ; C<sub>o</sub>: émission de CO<sub>2</sub> pour le mélange avec 100% ciment (MK0).

$$\frac{E_i - E_o}{E_o} \times 100 \quad \text{Eq :IV.3}$$

Avec :

E<sub>0</sub>: consommation d'énergie pour le mélange de témoin (MK0) ; E<sub>i</sub>: consommation d'énergie pour les mélanges des BAP mélangés avec le MK (i = MK5, MK10 et MK15).

*Tableau IV.1. Impact environnemental des mélanges des BAP sur les émissions de CO<sub>2</sub> pour 1 m<sup>3</sup> de BAP.*

Mélanges	Émission de CO <sub>2</sub> (Kg)					Émission de CO <sub>2</sub> (%)
	Extraction		Réaction chimique		Total	
	Ciment	MK	Ciment	MK		
<b>MK0</b>	244,90	*	224,70	0	469,6	*
<b>MK5</b>	232,65	3.27	213,46	0	449,38	-4,31
<b>MK10</b>	220,4	6.54	202,23	0	429,17	-8,61
<b>MK15</b>	208,16	8.86	190,99	0	408,01	-13,12

*Tableau IV.2. Impact environnemental des mélanges des BAP sur l'énergie pour 1 m<sup>3</sup> de BAP.*

Mélanges	Energie (GJ)			Energie (%)
	Ciment	MK	Total	
<b>MK0</b>	2,18	*	2,18	-
<b>MK5</b>	2,07	0,06	2,13	-2,3
<b>MK10</b>	1,97	0,11	2,08	-4,56
<b>MK15</b>	1,86	0,17	2,03	-6,88

Les tableaux IV.1 et IV.2 présentent les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie pour 1 m<sup>3</sup> de BAP. Comme le montrent dans les tableaux 5 et 6, la substitution de MK par une partie de ciment diminue les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie. La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est de -4,31% à -13,12% et la consommation d'énergie de -2,3 % à -6,88%, avec l'augmentation de substitution du ciment par le MK.

La comparaison des deux compositions avec et sans MK met en évidence que la composition où on a substitué le ciment par le MK réduit le plus les impacts environnementaux, donc elle est bien avantageuse du point de vue environnemental. Par ailleurs, des taux de substitution plus élevés produisent des impacts plus faibles.

De plus, les charges environnementales du transport et de l'extraction, ainsi que la demande en énergie cumulée sont réduites aussi. Cela explique, le fait que les compositions à base de MK, montrée un facteur favorable pour l'environnement en termes de consommations des énergies et des émissions des polluants atmosphériques. Ces constatations avantageuses indiquent que l'utilisation et la soumission de MK dans les projets comme ajout cimentaire aux marchés peut être bénéfique pour l'environnement.

Les principaux effets observés suite dans ce sont synthétisés dans le tableau IV.1.

## CHAPITRE IV : EFFET DE GV ET LE MK SUR LE COMPORTEMENT DES BAP À L'ETAT DURCI

**Tableau IV.3.** Principaux effets observés suite aux essais sur MAP et BAP aux essais de durabilité.

Mélanges	Résistance mécanique		Porosité		Perméabilité	
	Effet	Optimum	Effet	Optimum	Effet	Optimum
Témoin	–	–	–	–	–	–
5MK+0GV	↑↑	•	↑↑		↑↑	•
5MK+10GV	↑		↑		↑	
5MK+20GV	↓		↓		↓	
5MK+30GV	↓↓		↓↓		↓↓	
5MK+40GV	↓↓		↓↓		↓↓	
5MK+50GV	↓↓↓		↓↓↓		↓↓↓	
10MK+0GV	↑↑↑↑	•	↑↑↑↑		↑↑↑↑	•
10MK+10GV	↑↑↑		↑↑↑		↑↑↑	
10MK+20GV	↑↑		↑↑		↑↑	
10MK+30GV	↑↑		↑↑		↑↑	
10MK+40GV	↑		↑		↑	
10MK+50GV	↑	•	↑		↑	•
15MK+0GV	↑		↑		↑	
15MK+10GV	↓		↓		↓	
15MK+20GV	↓↓		↓↓		↓↓	
15MK+30GV	↓↓↓		↓↓↓		↓↓↓	
15MK+40GV	↓↓↓		↓↓↓		↓↓↓	
15MK+50GV	↓↓↓↓		↓↓↓↓		↓↓↓↓	

**Notes :** ↑ Faible effet positif, ↑↑ moyen, ↑↑↑ bon, ↑↑↑↑ excellent

↓ Faible effet négatif, ↓↓ moyen, ↓↓↓ mauvais, ↓↓↓↓ pire

### IV.6. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE DURABILITÉ

Les essais réalisés dans cette partie visent à évaluer l'influence de métakaolin comme ajout cimentaire et les granulats de verre comme sable sur le comportement physico-mécanique et les performances des mortiers autoplaçants (MAP) et béton autoplaçants (BAP). Les résultats issus de cette étude expérimentale ont permis de conclure que l'ajout de granulats de verre diminue les caractéristiques mécaniques à savoir la résistance à la compression, à la flexion et la vitesse d'auscultation sonore. Ceci est dû à la mauvaise adhérence entre la matrice de ciment et le squelette granulaire.

En termes de durabilité, la présence de granulats de verre active le phénomène de RAS, qui influe aussi négativement sur la structure poreuse de béton. Par contre la diminution de retrait  $\epsilon$ , l'absorption d'eau  $w$  et pour exposition à des températures élevées ont été observées dans les MAP avec l'utilisation de GV.

L'effet de l'introduction de métakaolin est nettement bénéfique et considérable sur les performances et la durabilité des MAP et BAP. On obtient une diminution du volume des éléments expansifs issus de RAS, et augmentant ainsi le taux d'amélioration des résistances mécaniques, ceci attribuée à la consommation d'une partie de C-H par la réaction pouzzolanique. L'effet synergique l'ajout de métakaolin et granulats de verre a permis d'améliorer les performances de BAP. La meilleure performance a été observée pour le mélange composé de 10% de MK. En raison de sa forte réactivité pouzzolanique alliée à sa finesse de mouture élevée.

Les résultats de différentes corrélations établies entre les propriétés du BAP à l'état durci révèlent que les relations entre les différents paramètres étudiés sont en bonne concordance et des coefficients acceptables ont été obtenus.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Cette présente étude a examiné les effets combinés de MK comme ajout cimentaire et de granulats de verre comme granulats sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité des BAP. Par la combinaison synergique de MK et GV, le travail vise à produire un béton autoplaçant économique, à faible impact environnemental, durable et sain. Afin de répondre à ces préoccupations, un programme expérimental a été mis en place pour comprendre et apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitué les objectifs du présent travail. Plusieurs enseignements ont été tirés :

### ✓ **Propriétés des BAP à l'état frais**

- L'utilisation des déchets de verre et metakaolin a permis d'obtenir des BAP fluides, homogènes et stables qui répondent aux critères de fabrication des BAP ;
- La fluidité des BAP dépend le dosage de MK et GV utilisés ;
- L'incorporation de 50 % du GV a amélioré la fluidité, la capacité de passage et remplissage des BAP, avec des faibles dosages en SP pour maintenir les mêmes propriétés visées. Cette amélioration est très importante pour avoir un BAP conforme aux exigences recommandées ;
- Une augmentation de 50 % de GV du verre a réduit la viscosité du BAP, ce qui augmente le risque de ségrégation de BAP ;
- En ce qui concerne les paramètres rhéologiques de BAP, l'augmentation de pourcentage du verre a réduit le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Le mélange avec 15MK+0 GV a eu la plus forte contrainte de cisaillement et la viscosité plastique la plus importante ;

### ✓ Propriété des bétons à l'état durci

- Une augmentation du pourcentage de GV a réduit la résistance à la traction de l'ordre de 21 % pour le mélange avec (15MK + 50GV) par rapport à celle de mélange sans GV (15MK + 0 GV);
- La résistance à la compression et le VAS des BAP ont diminuées avec l'augmentation de pourcentage du GV pour tous les âges de durcissement. Cependant, la présence de MK a amélioré la résistance à la compression et les valeurs de VAS des mélanges de BAP mieux que le BAP témoin. Le groupe de 10 % MK donnait les meilleures performances mécaniques ;
- L'absorption d'eau par immersion totale a diminué avec l'augmentation de la quantité du GV. Les mélanges avec 10 % de MK avaient la plus faible absorption en raison de leur faible porosité ;
- L'utilisation de MK dans les mélanges de GV pourrait réduire l'expansion de la réaction alcali silice. Les mélanges avec 10 à 15 % de MK avaient des valeurs faibles de RAS par rapport au mélange qui contient 5% de MK, qui sont inférieurs à la limite de 0,1 % de RAS ;
- L'ajout de GV a amélioré la résistance à haute température des BAP, quel que soit le niveau de remplacement de MK.
- Pour la porosité et la perméabilité à gaz, il y a eu une diminution d'environ 46% de la porosité et de 25 % de la perméabilité à gaz pour le mélange avec 10MK et 50GV comparativement au BAP témoin ;
- La résistance à la perméabilité des ions chlorures des mélanges fabriqués avec le MK et GV était beaucoup plus élevée que la BAP témoin.
- L'analyse par le MEB a indiqué que l'utilisation de MK dans les mélanges de GV a entraîné une amélioration de la porosité par remplissage des pores suite à la formation des nouveaux hydrates par l'effet pozzolanique de MK surtout à long terme.

# **PERSPECTIVES**

## **PERSPECTIVES**

Dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse de doctorat et sur la base des résultats intéressants trouvés, des travaux restent ont permis d'apporter quelques éléments de réponses aux préoccupations posées, mais ils ont soulevé aussi quelques points intéressants à explorer à l'avenir.

L'utilisation d'autres ajouts cimentaire (PZ, laitiers .....) pour avoir un effet combiné avec les granulats de verre dans les mélanges des bétons ;

- L'effet de métakaolin comme ajout cimentaire avec d'autres granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et durabilité des bétons ;
- L'effet de métakaolin comme un géopolymère sur les performances des bétons autoplaçants ;
- Étude d'autres propriétés de durabilité telles que la carbonatation et l'attaque aux agents agressifs ;
- L'effet de metakaolin et la poudre de verre comme ajout cimentaire ternaire sur les propriétés des bétons autoplaçants
- Prévoir une modélisation des résultats trouvés permettant les prévisions des caractéristiques des bétons.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] T.C. Holland, Sustainability of the Concrete Industry—What Should Be ACI's Role?, *Concrete International* 24(7) (2002) 35-40.
- [2] U.-M. Mroueh, J. Laine-Ylijoki, P. Eskola, Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction, *Waste Management Series*, Elsevier2000, pp. 438-448.
- [3] M. Maslehuddin, A.M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M. Barry, Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes, *Construction and building materials* 17(2) (2003) 105-112.
- [4] W. Cai, C. Liu, C. Zhang, M. Ma, W. Rao, W. Li, K. He, M. Gao, Developing the ecological compensation criterion of industrial solid waste based on emergy for sustainable development, *Energy* 157 (2018) 940-948.
- [5] İ. Şanal, Discussion on the effectiveness of cement replacement for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission reduction in concrete, *Greenhouse Gases: Science and Technology* 8(2) (2018) 366-378.
- [6] G. Sua-iam, N. Makul, Incorporation of high-volume fly ash waste and high-volume recycled alumina waste in the production of self-consolidating concrete, *Journal of Cleaner Production* 159 (2017) 194-206.
- [7] N. Singh, J. Li, X. Zeng, Global responses for recycling waste CRTs in e-waste, *Waste Management* 57 (2016) 187-197.
- [8] M. Sarıdemir, M. Çiflikli, F. Soysat, Mechanical and microstructural properties of HFRHSCs containing metakaolin subjected to elevated temperatures and freezing-thawing cycles, *Construction and Building Materials* 158 (2018) 11-23.
- [9] S.B. Daneti, C.T. Tam, Sustainability of Concrete Constructions: The Role of Materials and Practices, *Emerging Trends in Civil Engineering*, Springer2020, pp. 381-395.
- [10] S. Boudali, S. Godbout, J. Palacios, INVESTIGATING POTENTIAL IMPLEMENTATION OF DIFFERENT AGRO-WASTES IN CONCRETE, (2019).
- [11] Y.-F. Yang, G.-L. Ma, Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams, *Thin-Walled Structures* 66 (2013) 62-75.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [12] V. Letelier, E. Tarela, G. Moriconi, Mechanical properties of concretes with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement, *Procedia Eng* 171 (2017) 627-632.
- [13] C. Thormark, The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building, *Building and environment* 41(8) (2006) 1019-1026.
- [14] M.S. Meddah, Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2017, p. 05021.
- [15] T. CEMBUREAU, *World Statistical Review 1996-2008 Cement Production, Trade, Consumption Data* (2010).
- [16] L. Szabó, I. Hidalgo, J.C. Císcar, A. Soria, P. Russ, Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from the world cement industry, *European Commission Joint Research Centre, Report EUR 20769* (2003).
- [17] A. Palomo, P. Monteiro, P. Martauz, V. Bílek, A. Fernandez-Jimenez, Hybrid binders: A journey from the past to a sustainable future (opus caementicium futurum), *Cement and Concrete Research* 124 (2019) 105829.
- [18] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research* 114 (2018) 2-26.
- [19] A. Adesina, P. Awoyera, Utilization of biomass energy in cement production: a pathway towards sustainable infrastructure, *Renewable Energy and Sustainable Buildings*, Springer2020, pp. 791-799.
- [20] F. FAO, *Agriculture Organization of the United Nations (2013) Food wastage footprint, Impacts on natural resources. Summary Report. Rome.*
- [21] R.M. Andrew, Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, *Earth System Science Data* 10(1) (2018) 195.
- [22] L'industrie du ciment, *Revue de ministre et l'industrie et des mines, Algérie*, 2017, p. 5.
- [23] G. Moumin, M. Ryssel, L. Zhao, P. Markewitz, C. Sattler, M. Robinius, D. Stolten, CO<sub>2</sub> emission reduction in the cement industry by using a solar calciner, *Renewable energy* 145 (2020) 1578-1596.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [24] A.K. Parande, B.R. Babu, M.A. Karthik, K.D. Kumaar, N. Palaniswamy, Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar, *Construction and Building Materials* 22(3) (2008) 127-134.
- [25] G. Sposito, *The Chemistry of Soil*, 3rd ed. Oxford University Press, New York, , (2016) 225.
- [26] J.M. Khatib, O. Baalbaki, A.A. ElKordi, Metakaolin, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Elsevier2018, pp. 493-511.
- [27] B.R. Ilić, A.A. Mitrović, L.R. Miličić, Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin, *Hemjska industrija* 64(4) (2010) 351-356.
- [28] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zongjin, Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement, *Applied Clay Science* 47(3-4) (2010) 271-275.
- [29] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani, Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials* 41 (2013) 879-888.
- [30] Z. Li, Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Cement and Concrete Research* 33(4) (2003) 579-584.
- [31] J. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials* 22(9) (2008) 1963-1971.
- [32] A. Boddy, R. Hooton, K. Gruber, Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin, *Cement and concrete research* 31(5) (2001) 759-765.
- [33] R. Siddique, A. Kaur, Effect of metakaolin on the near surface characteristics of concrete, *Materials and structures* 44(1) (2011) 77-88.
- [34] K. Behfarnia, O. Farshadfar, The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack, *Construction and Building Materials* 38 (2013) 64-71.
- [35] K.A. Melo, A.M. Carneiro, Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 24(8) (2010) 1529-1535.
- [36] J. Brooks, M.M. Johari, M. Mazloom, Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete, *Cement and concrete Composites* 22(4) (2000) 293-301.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [37] M. Sonebi, M. Lachemi, K. Hossain, Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture, *Construction and Building Materials* 38 (2013) 126-138.
- [38] E. Moulin, P. Blanc, D. Sorrentino, Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements, *Cement and Concrete Composites* 23(6) (2001) 463-469.
- [39] G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsivilis, E. Badogiannis, The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Cement and Concrete Composites* 27(1) (2005) 125-130.
- [40] E. Badogiannis, G. Kakali, G. Dimopoulou, E. Chaniotakis, S. Tsivilis, Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins, *Cement and Concrete Composites* 27(2) (2005) 197-203.
- [41] O. Khaleel, H.A. Razak, The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar, *Construction and Building Materials* 36 (2012) 20-26.
- [42] O. Khaleel, H.A. Razak, Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate, *Materials & Design* 53 (2014) 691-700.
- [43] A.M. Rashad, Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview, *Construction and building materials* 41 (2013) 303-318.
- [44] A.M. Rashad, A.A. Hassan, S.R. Zeedan, An investigation on alkali-activated Egyptian metakaolin pastes blended with quartz powder subjected to elevated temperatures, *Applied Clay Science* 132 (2016) 366-376.
- [45] J. Bai, S. Wild, A. Gailius, Accelerating early strength development of concrete using metakaolin as an admixture, *Mater Sci* 10(4) (2004) 338-344.
- [46] A.P. Shelorkar, P.D. Jadhao, Strength appraisal of high grade concrete by using high reactive metakaolin, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2(3) (2013) 657-663.
- [47] P. Dinakar, P.K. Sahoo, G. Sriram, Effect of metakaolin content on the properties of high strength concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 7(3) (2013) 215.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [48] A. Ramezaniapour, H.B. Jovein, Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, *Construction and Building materials* 30 (2012) 470-479.
- [49] J. Khatib, Low temperature curing of metakaolin concrete, *Journal of materials in civil engineering* 21(8) (2009) 362-367.
- [50] H.E.D.H. Seleem, A.M. Rashad, T. Elsokary, Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete, *Construction and building Materials* 25(2) (2011) 1009-1017.
- [51] H. Paiva, A. Velosa, P. Cachim, V. Ferreira, Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete, *Cement and Concrete Research* 42(4) (2012) 607-612.
- [52] B. Rabehi, Y. Ghernouti, K. Boumchedda, Strength and compressive behaviour of ultra high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) incorporating Algerian calcined clays as pozzolanic materials and silica fume, *European journal of environmental and civil engineering* 17(8) (2013) 599-615.
- [53] S. Potgieter-Vermaak, J. Potgieter, Metakaolin as an extender in South African cement, *Journal of materials in civil engineering* 18(4) (2006) 619-623.
- [54] S.C. Taylor-Lange, K.A. Riding, M.C. Juenger, Increasing the reactivity of metakaolin-cement blends using zinc oxide, *Cement and Concrete Composites* 34(7) (2012) 835-847.
- [55] R.M. De Gutiérrez, J. Torres, C. Vizcayno, R. Castelló, Influence of the calcination temperature of kaolin on the mechanical properties of mortars and concretes containing metakaolin, *Clay minerals* 43(2) (2008) 177-183.
- [56] C. He, E. Makovicky, B. Osbaeck, Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin, *Applied Clay Science* 9(3) (1994) 165-187.
- [57] M. Said-Mansour, E.-H. Kadri, S. Kenai, M. Ghrici, R. Bennaceur, Influence of calcined kaolin on mortar properties, *Construction and building Materials* 25(5) (2011) 2275-2282.
- [58] H.-S. Kim, S.-H. Lee, H.-Y. Moon, Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin, *Construction and building materials* 21(6) (2007) 1229-1237.
- [59] N. John, Strength properties of metakaolin admixed concrete, *International Journal of scientific and research publications* 3(6) (2013) 1-7.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [60] A. Yerramala, C. Ramachandurdu, V.B. Desai, Flexural strength of metakaolin ferrocement, *Composites Part B: Engineering* 55 (2013) 176-183.
- [61] L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research* 33(9) (2003) 1473-1479.
- [62] J. Rani, S. Sharma, V. Dhillon, Improving Properties of Concrete Replacing Cement and Natural Sand with Metakolin and Robo Sand, (2019).
- [63] X. Qian, Z. Li, The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, *Cement and concrete Research* 31(11) (2001) 1607-1611.
- [64] J. Khatib, J. Hibbert, Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, *Construction and building materials* 19(6) (2005) 460-472.
- [65] J. Khatib, Metakaolin concrete at a low water to binder ratio, *Construction and Building Materials* 22(8) (2008) 1691-1700.
- [66] A.S. Gill, R. Siddique, Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash, *Construction and Building Materials* 176 (2018) 323-332.
- [67] J. Brooks, M.M. Johari, Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement and concrete composites* 23(6) (2001) 495-502.
- [68] S. Wild, J. Khatib, L. Roose, Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement—metakaolin pastes, *Advances in cement research* 10(3) (1998) 109-119.
- [69] J. Bai, S. Wild, J. Ware, B. Sabir, Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash, *Advances in Engineering Software* 34(11-12) (2003) 663-669.
- [70] A. Asbridge, G. Chadbourn, C. Page, Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars, *Cement and Concrete Research* 31(11) (2001) 1567-1572.
- [71] A.N. Borade, B. Kondraivendhan, Corrosion behavior of reinforced concrete blended with metakaolin and slag in chloride environment, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 8(6) (2019) 367-386.
- [72] W. Aquino, D.A. Lange, J. Olek, The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali–silica reaction products, *Cement and Concrete Composites* 23(6) (2001) 485-493.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [73] K. Gruber, T. Ramlochan, A. Boddy, R. Hooton, M. Thomas, Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, *Cement and concrete composites* 23(6) (2001) 479-484.
- [74] S. Wild, J.M. Khatib, A. Jones, Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete, *Cement and concrete research* 26(10) (1996) 1537-1544.
- [75] I. El-Darwish, A. Kurdi, H. Mahmoud, H. El-Kair, Mechanical properties and durability of Portland cement concrete incorporating ground steel making slag, *AEJ Alexandria Engineering Journal* 36 (1997).
- [76] S. Mindess, F. Young, D. Darwin, *Concrete 2nd Editio*, Technical Documents (2003).
- [77] S. Wild, J. Khatib, Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars, *Cement and concrete research* 27(1) (1997) 137-146.
- [78] S. Wild, J. Khatib, M. Craythorne, Strength development of mortar containing metakaolin, *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Building Materials, Structure and Techniques*, 1997, pp. 58-63.
- [79] N.M. Al-Akhras, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, *Cement and concrete research* 36(9) (2006) 1727-1734.
- [80] I.B. Topcu, M. Canbaz, Properties of concrete containing waste glass, *Cement and concrete research* 34(2) (2004) 267-274.
- [81] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, J. Labrincha, V. John, *Eco-efficient concrete*, Elsevier 2013.
- [82] D. Romero, J. James, R. Mora, C.D. Hays, Study on the mechanical and environmental properties of concrete containing cathode ray tube glass aggregate, *Waste management* 33(7) (2013) 1659-1666.
- [83] Y. Jani, W. Hogland, Waste glass in the production of cement and concrete—A review, *Journal of environmental chemical engineering* 2(3) (2014) 1767-1775.
- [84] United State Environmental Protection Agency report, <http://www.epa.gov/epawaste/conserva/materials/glass.htm>, 2012.
- [85] L. Federico, S. Chidiac, Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete—critical review of treatment methods, *Cement and concrete composites* 31(8) (2009) 606-610.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [86] K.H. Tan, H. Du, Use of waste glass as sand in mortar: Part I–Fresh, mechanical and durability properties, *Cement and Concrete Composites* 35(1) (2013) 109-117.
- [87] C. Ambell, A. Björklund, M. Ljunggren Söderman, Potential för ökad materialåtervinning av hushållsavfall och industriavfall, KTH, 2010.
- [88] L.A. Pereira-de-Oliveira, J.P. Castro-Gomes, P.M. Santos, The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components, *Construction and Building Materials* 31 (2012) 197-203.
- [89] Z. Hui, C.S. Poon, T.C. Ling, Properties of mortar prepared with recycled cathode ray tube funnel glass sand at different mineral admixture, *Construction and Building Materials* 40 (2013) 951-960.
- [90] H. Zhao, C.S. Poon, T.C. Ling, Utilizing recycled cathode ray tube funnel glass sand as river sand replacement in the high-density concrete, *Journal of cleaner production* 51 (2013) 184-190.
- [91] G. Sua-iam, N. Makul, Use of limestone powder during incorporation of Pb-containing cathode ray tube waste in self-compacting concrete, *Journal of environmental management* 128 (2013) 931-940.
- [92] E.E. Ali, S.H. Al-Tersawy, Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete, *Construction and Building Materials* 35 (2012) 785-791.
- [93] Z. Hui, W. Sun, Study of properties of mortar containing cathode ray tubes (CRT) glass as replacement for river sand fine aggregate, *Construction and Building Materials* 25(10) (2011) 4059-4064.
- [94] B. Taha, G. Nounu, Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement, *Construction and Building Materials* 22(5) (2008) 713-720.
- [95] T.-C. Ling, C.-S. Poon, W.-S. Lam, T.-P. Chan, K.K.-L. Fung, Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation-shielding applications, *Journal of hazardous materials* 199 (2012) 321-327.
- [96] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Effects of particle size of treated CRT funnel glass on properties of cement mortar, *Materials and structures* 46(1-2) (2013) 25-34.
- [97] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete, *Journal of cleaner production* 33 (2012) 42-49.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [98] M.I. Malik, A. Manzoor, B. Ahmad, S. Asima, R. Ali, M. Bashir, Positive potential of partial replacement of fine aggregates by waste glass (< 600 micron) in concrete, *Int J Civ Eng Technol* 5(11) (2014) 146-153.
- [99] M. Adaway, Y. Wang, Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete—Effects on compressive strength, *Electronic Journal of Structural Engineering* 14(1) (2015) 116-122.
- [100] P. Turgut, E. Yahlizade, Research into concrete blocks with waste glass, *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 1(4) (2009) 203-209.
- [101] C. Chen, R. Huang, J. Wu, C. Yang, Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, *cement and concrete research* 36(3) (2006) 449-456.
- [102] L.A.P.d. Oliveira, J.C. Gomes, P. Santos, Mechanical and durability properties of concrete with ground waste glass sand, *artigo em encontro científico internacional* (2008).
- [103] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste management* 27(12) (2007) 1870-1876.
- [104] N. Tamanna, R. Tuladhar, N. Sivakugan, Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete, *Construction and Building Materials* 239 (2020) 117804.
- [105] S.C. Bostanci, Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production, *Journal of Cleaner Production* 251 (2020) 119785.
- [106] J.-J. Zeng, X.-W. Zhang, G.-M. Chen, X.-M. Wang, T. Jiang, FRP-confined recycled glass aggregate concrete: Concept and axial compressive behavior, *Journal of Building Engineering* (2020) 101288.
- [107] Z.Z. Ismail, E.A. Al-Hashmi, Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, *Waste management* 29(2) (2009) 655-659.
- [108] S.B. Park, B.C. Lee, J.H. Kim, Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and concrete research* 34(12) (2004) 2181-2189.
- [109] S. Abdallah, M. Fan, Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* 2(6) (2014) 11-17.
- [110] M.C. Limbachiya, Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete, *Construction and Building Materials* 23(2) (2009) 1078-1083.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [111] T.-C. Ling, C.-S. Poon, A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar, *Journal of cleaner production* 29 (2012) 46-52.
- [112] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar, *Journal of Hazardous Materials* 192(2) (2011) 451-456.
- [113] W. Her-Yung, A study of the engineering properties of waste LCD glass applied to controlled low strength materials concrete, *Construction and Building Materials* 23(6) (2009) 2127-2131.
- [114] W. Song, D. Zou, T. Liu, J. Teng, L. Li, Effects of recycled CRT glass fine aggregate size and content on mechanical and damping properties of concrete, *Construction and Building Materials* 202 (2019) 332-340.
- [115] F. Debieb, Performance et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates, Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger-Algérie, (2007), p. 204.
- [116] J. Castro, D. Bentz, J. Weiss, Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete, *Cement and Concrete Composites* 33(8) (2011) 805-813.
- [117] R. Henkensiefken, J. Castro, D. Bentz, T. Nantung, J. Weiss, Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate, *Cement and Concrete Research* 39(10) (2009) 883-892.
- [118] T. Liu, H. Wei, D. Zou, A. Zhou, H. Jian, Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high performance concrete, *Journal of Cleaner Production* 249 (2020) 119333.
- [119] A.M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash, *Materials & Design* 53 (2014) 1005-1025.
- [120] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Use of CRT funnel glass in concrete blocks prepared with different aggregate-to-cement ratios, *Green Materials* 2(1) (2014) 43-51.
- [121] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks, *Journal of cleaner production* 68 (2014) 209-215.
- [122] S. Kou, C. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete composites* 31(9) (2009) 622-627.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [123] G. West, Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges, Thomas Telford 1996.
- [124] C. Meyer, Y. Xi, Use of recycled glass and fly ash for precast concrete, *Journal of materials in civil engineering* 11(2) (1999).
- [125] M. Mirzahosseini, K.A. Riding, Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM), *Cement and Concrete Composites* 56 (2015) 95-105.
- [126] M.J. Terro, Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures, *Building and environment* 41(5) (2006) 633-639.
- [127] H. Maraghechi, G. Fischer, F. Rajabipour, The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates, *Cement and Concrete Composites* 34(1) (2012) 41-47.
- [128] S. Kou, C. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate, *Cement and Concrete Composites* 31(2) (2009) 107-113.
- [129] A. Mohajerani, J. Vajna, T.H.H. Cheung, H. Kurmus, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review, *Construction and Building Materials* 156 (2017) 443-467.
- [130] H.-Y. Wang, W.-L. Huang, Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass, *Construction and Building Materials* 24(6) (2010) 1008-1013.
- [131] M. Tuncan, B. Karasu, M. Yalcin, The suitability for using glass and fly ash in Portland cement concrete, *The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001.
- [132] M. Martín-Morales, G. Cuenca-Moyano, I. Valverde-Espinosa, I. Valverde-Palacios, Effect of recycled aggregate on physical-mechanical properties and durability of vibro-compacted dry-mixed concrete hollow blocks, *Construction and Building Materials* 145 (2017) 303-310.
- [133] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes, *Materials & Design* 32(5) (2011) 2675-2684.
- [134] S. de Castro, J. de Brito, Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, *Journal of Cleaner Production* 41 (2013) 7-14.
- [135] A. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, S. Kenai, Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 31 (2012) 251-257.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [136] A. Loukili, *Self-compacting concrete*, John Wiley & Sons 2013.
- [137] B. Benabed, E.-H. Kadri, L. Azzouz, S. Kenai, Properties of self-compacting mortar made with various types of sand, *Cement and Concrete Composites* 34(10) (2012) 1167-1173.
- [138] O. Boukendakdji, S. Kenai, E. Kadri, F. Rouis, Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete, *Construction and Building Materials* 23(7) (2009) 2593-2598.
- [139] O. Boukendakdji, E.-H. Kadri, S. Kenai, Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete, *Cement and concrete composites* 34(4) (2012) 583-590.
- [140] Y.F. Silva, D.A. Lange, S. Delvasto, Effect of incorporation of masonry residue on the properties of self-compacting concretes, *Construction and Building materials* 196 (2019) 277-283.
- [141] D.S. Law Yim Wan, F. Aslani, G. Ma, Lightweight self-compacting concrete incorporating Perlite, Scoria, and Polystyrene aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering* 30(8) (2018) 04018178.
- [142] A. Boukhelkhal, L. Azzouz, S. Kenai, E.-H. Kadri, 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, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 307-318.
- [143] K.H. Khayat, D. Feys, *Design, Production and Placement of Self-consolidating Concrete: Proceedings of SCC2010*, Montreal, Canada, September 26-29, 2010, Springer Science & Business Media 2010.
- [144] G. De Schutter, P.J. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, *Self-compacting concrete*, Whittles Publishing Caithness 2008.
- [145] A. Poitou, G. Racineux, A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspensions, *Journal of Rheology* 45(3) (2001) 609-625.
- [146] AFGC, *Bétons autoplaçants Recommandations provisoires*, Association française génie civil, 2000.
- [147] M. EFNARC, *The European Federation of Specialist Construction and Concrete System" The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use* (2005).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [148] H. Soualhi, E.-H. Kadri, T.-T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, Z.-E.-A. Tahar, Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters, *Journal of civil engineering and management* 23(3) (2017) 347-355.
- [149] P.R. de Matos, A.L. de Oliveira, F. Pelisser, L.R. Prudêncio Jr, Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue, *Construction and Building Materials* 175 (2018) 508-518.
- [150] C.F. Ferraris, Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report, *Journal of research of the national institute of standards and technology* 104(5) (1999) 461.
- [151] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, H. Li, Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review, *Cement and concrete composites* 83 (2017) 146-159.
- [152] K. Kovler, N. Roussel, Properties of fresh and hardened concrete, *Cement and Concrete Research* 41(7) (2011) 775-792.
- [153] P. Domone, Mortar tests for material selection and mix design of SCC, *Concrete International* 28(4) (2006) 39-45.
- [154] H. Okamura, K. Ozawa, Mix design for self-compacting concrete, *Concrete library of JSCE* 25(6) (1995) 107-120.
- [155] Q. Wu, X. An, Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste, *Construction and Building Materials* 53 (2014) 642-651.
- [156] N. Su, K.-C. Hsu, H.-W. Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cement and concrete research* 31(12) (2001) 1799-1807.
- [157] H. Okamura, K. Ozawa, Self-compactable high-performance concrete in Japan, *Special publication* 159 (1996) 31-44.
- [158] T. Sedran, LES BETONS AUTONIVELANTS (BAN)-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées* (196) (1995).
- [159] B. Van Khanh, D. Montgomery, Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume, *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 373-384.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [160] P. Turcry, A. Loukili, Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants: Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques, *Revue française de génie civil* 7(4) (2003) 425-450.
- [161] H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *structural Concrete* 1(1) (2000) 3-17.
- [162] M. Ouchi, S. Nakamura, T. Osterberg, S. Hallberg, M. Lwin, Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States, Kochi University of Technology, Kochi, Japan (2003).
- [163] O. Boukendakdji, Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires, Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb, Blida-Algerie, (2010), pp. 1-185.
- [164] A. Belaidi, Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels, Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb Blida-Algerie, (2013), pp. 1-192.
- [165] T. Bouziani, Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach, *Construction and Building Materials* 49 (2013) 308-314.
- [166] B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, M. Maallem, The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials* 43 (2013) 436-442.
- [167] B. Benabed, Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de doctorat, Université Amar Telidji Laghouat-Agerie, (2014), pp. 1-226.
- [168] T.A. Boucetta 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 Badji Mokhtar Anaba-Algerie, (2014), pp. 1-210.
- [169] N. Haddadou, R. Chaid, Y. Ghernouti, N. Adjou, The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete, *Journal of Building Materials and Structures* 1(2) (2014) 65-76.
- [170] Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, A. Makhloufi, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), *Construction and Building Materials* 82 (2015) 89-100.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [171] A. Boukhelkhal, L. Azzouz, A.S.E. Belaïdi, B. Benabed, Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete, *Journal of adhesion science and Technology* 30(22) (2016) 2405-2419.
- [172] I. Irki, F. Debieb, E.-H. Kadri, O. Boukendakdji, M. Bentchikou, H. Soualhi, Effect of the length and the volume fraction of wavy steel fibers on the behavior of self-compacting concrete, *Journal of adhesion science and Technology* 31(7) (2017) 735-748.
- [173] I. Irki, Renforcement du beton autoplaçant (bap) par des fibres : utilisation dans la reparation des structures endommagees, Thèse de doctorat,, Université Yahia Fares Medea-Algerie, (2017), pp. 1-207.
- [174] I. Irki, F. Debieb, S. Ouzadid, H.L. Dilmi, C. Settari, D. Boukhelkhal, Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar, *Journal of adhesion science and Technology* 32(9) (2018) 963-975.
- [175] M. Omrane, S. Kenai, E.-H. Kadri, A. Aït-Mokhtar, Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan, *Journal of Cleaner Production* 165 (2017) 415-430.
- [176] M. Salhi, M. Ghrici, A. Li, T. Bilir, Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete, *Advances in concrete construction* 5(4) (2017) 359.
- [177] I. Irki, M. Euldji, H. Bensaber, C. Settari, Characterization of stem phoenix fibres as potential reinforcement of self compacting mortar, *Journal of adhesion science and Technology* 32(15) (2018) 1629-1642.
- [178] O.K. Djelloul, B. Menadi, G. Wardeh, S. Kenai, Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag, *Advances in concrete construction* 6(2) (2018) 103.
- [179] D. Boukhelkhal, O. Boukendakdji, S. Kenai, E.-H. Kadri, Combined effect of mineral admixture and curing temperature on mechanical behavior and porosity of SCC, *Advances in concrete construction* 6(1) (2018) 069.
- [180] B. Hamza, M. Belkacem, K. Said, Y. Walid, Performance of self-compacting rubberized concrete, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, p. 01070.
- [181] A. Benyahia, M. Ghrici, Behaviour of self compacting repair mortars based on natural pozzolana in hot climate, *Advances in concrete construction* 6(3) (2018) 285-296.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [182] A. Boukhelkhal, Comportement physico-mecanique et durabilite en climat chaud des mortiers autoplaçants à base d'ajouts binaires et ternaires., Thèse de doctorat,, Université Amar Telidji Laghouat-Algerie, (2019), pp. 1-239.
- [183] Z. Skender, A. Bali, R. Kettab, Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2019) 1-22.
- [184] M. Sahraoui, T. Bouziani, Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC, *Journal of Building Engineering* 26 (2019) 100890.
- [185] Z.E.-A. Laidani, B. Benabed, R. Abousnina, M.K. Gueddouda, 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, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2020) 1-23.
- [186] Y.Hadj-Aissa, I. Goual, B. Benabed, Mix-design and properties of self-compacting concrete made with calcareous tuff, *Journal of Building Engineering* 27 (2020) 100997.
- [187] A. Barkat, S. Kenai, B. Menadi, E. Kadri, H. Soualhi, Effects of local metakaolin addition on rheological and mechanical performance of self-compacting limestone cement concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology* 33(9) (2019) 963-985.
- [188] S. Benyamina, B. Menadi, S.K. Bernard, S. Kenai, Performance of self-compacting concrete with manufactured crushed sand, *Advances in concrete construction* 7(2) (2019) 87.
- [189] I. Zemir, F. Debieb, S. Kenai, Y. Ouldkhaoua, I. Irki, Strengthening of ordinary vibrated concrete using steel fibers self-compacting concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology* (2020) 1-16.
- [190] B. En, 197-1. Cement–Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, British Standards Institution (2000).
- [191] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete–*Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, (2003).
- [192] P. Domone, J. Jin, Properties of mortar for self-compacting concrete, *Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete*, 1999, pp. 109-120.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [193] H. Soualhi, E.-H. Kadri, T.-T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, S. Kenai, A vane rheometer for fresh mortar: development and validation, *Applied Rheology* 24(2) (2014) 1-7.
- [194] B. EN, 12390-3: 2009, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens (2009) 12390-5.
- [195] 1994, NF P15-433. Methods of cement testing. Determination of shrinkage and swelling.
- [196] J.-X. Lu, B.-J. Zhan, Z.-H. Duan, C.S. Poon, Improving the performance of architectural mortar containing 100% recycled glass aggregates by using SCMs, *Construction and Building Materials* 153 (2017) 975-985.
- [197] C. ASTM, 1260, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). American Society of Testing Materials (2007).
- [198] C. Astm, 642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, *Annual book of ASTM standards* 4 (2006) 02.
- [199] B. EN, 12350-8, 2010 Testing fresh concrete, Part 8: Selfcompacting concrete, Slump-flow test, British Standards Publication (2010).
- [200] B. EN, 12350. Testing fresh concrete, self-compacting concrete; Technical committee, British Standards Institution: London, UK (2010).
- [201] B. EN, 12350-10.(2010). Testing Self Compacting Concrete: L-Box Test, British Standard Int.
- [202] B. EN, 12350-11.(2010). Testing Self Compacting Concrete: Sieve Segregation Test, British Standard Int.
- [203] N. EN, 196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques, French Standard (2006).
- [204] C. Astm, 597, Standard test method for pulse velocity through concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA (2009).
- [205] P. NF, P 18-459, Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique, Mars (2010).
- [206] X. P18-463, Testing gas permeability on hardened concrete. , 2011.
- [207] C. AsTM, 1202, Rapid Chloride Permeability (1997).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [208] T. Nawa, State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete, Proc. of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, 1999, pp. 160-190.
- [209] A.M. Rashad, Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement, Construction and building materials 72 (2014) 340-357.
- [210] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Use of CRT funnel glass in concrete blocks prepared with different aggregate-to-cement ratios, Green Mater 2(GMAT1) (2014) 43-51.
- [211] E.-H. Kadri, S. Kenai, K. Ezziane, R. Siddique, G. De Schutter, Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar, Applied Clay Science 53(4) (2011) 704-708.
- [212] R. Madandoust, S.Y. Mousavi, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin, Construction and Building Materials 35 (2012) 752-760.
- [213] R. Muduli, B.B. Mukharjee, Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete, Journal of cleaner production 209 (2019) 398-414.
- [214] Y. Sharifi, M. Houshiar, B. Aghebati, Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete, Frontiers of Structural and Civil Engineering 7(4) (2013) 419-428.
- [215] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin, Materials and Structures 41(9) (2008) 1519-1531.
- [216] G. Lee, T.-C. Ling, Y.-L. Wong, C.-S. Poon, Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks, Construction and Building Materials 25(5) (2011) 2611-2618.
- [217] P. Ghoddousi, A.A.S. Javid, J. Sobhani, Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures, Construction and building materials 53 (2014) 102-109.
- [218] A. Hassan, M. Lachemi, K. Hossain, Effect of metakaolin on the rheology of self-consolidating concrete, Design, production and placement of self-consolidating concrete, Springer2010, pp. 103-112.
- [219] G. Dreux, J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles1998.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [220] P.N. Quiroga, The effect of the aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete, 2003.
- [221] T. Sedran, F. De Larrard, Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model, Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7, 1999, pp. 321-332.
- [222] M. Cyr, M. Mouret, Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: consequences on self-compacting concrete design, Special Publication 217 (2003) 241-256.
- [223] S. Safiddine, Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques du béton a base de sable de concassage, Thèse de doctorat,, Université Saad Dahleb Blida-Algérie (2018), p. 153.
- [224] M. Cyr, C. Legrand, M. Mouret, Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, Cement and concrete research 30(9) (2000) 1477-1483.
- [225] A.W. Saak, H.M. Jennings, S.P. Shah, New methodology for designing self-compacting concrete, Materials Journal 98(6) (2001) 429-439.
- [226] L.A. Schwartzentruber, R. Le Roy, J. Cordin, Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), Cement and Concrete Research 36(7) (2006) 1203-1213.
- [227] C.F. Ferraris, F. de Larrard, Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete, Cement, Concrete and Aggregates 20(2) (1998) 241-247.
- [228] P. Diederich, Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [229] G. Jiang, Z. Rong, W. Sun, Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio, Construction and Building Materials 93 (2015) 564-572.
- [230] T. Drzymała, B. Zegardło, P. Tofilo, Properties of Concrete Containing Recycled Glass Aggregates Produced of Exploded Lighting Materials, Materials 13(1) (2020) 226.
- [231] S. Barbhuiya, P. Chow, S. Memon, Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin, Construction and Building Materials 95 (2015) 696-702.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [232] M. Uysal, M. Sumer, Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures, *Construction and Building materials* 25(11) (2011) 4112-4120.
- [233] H.-Y. Wang, W.-L. Huang, A study on the properties of fresh self-consolidating glass concrete (SCGC), *Construction and Building Materials* 24(4) (2010) 619-624.
- [234] D. Grdić, N. Ristić, G. Topličić-Ćurčić, D. Krstić, Potential of usage of self compacting concrete with addition of recycled CRT glass for production of precast concrete elements, *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering* 16(1) (2018) 057-066.
- [235] M.I. Safawi, I. Iwaki, T. Miura, A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete, *Cement and concrete research* 35(9) (2005) 1834-1845.
- [236] H. Umehara, T. Uehara, Y. Enomoto, S. Oka, Development and usage of lightweight high performance concrete, *Proceedings of International Conference on high Performance Concrete (supplementary papers)*, Singapore, American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 1994, pp. 339-353.
- [237] G. Kuruppu, R. Chandratilake, Use of recycle glass as a coarse aggregate in concrete, *world construction conference*, 2012, pp. 28-30.
- [238] R. Rohit, D. Kumar, M.Z. Anwar, S. Alam, D.K. Vishwakarma, Study on Compressive Strength of Concrete by Partial Replacement of Cement with Metakaolin, *International Journal of Architectural Heritage* 2(1) (2019) 26-36.
- [239] R. Muduli, B.B. Mukharjee, Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach, *Construction and Building Materials* 233 (2020) 117223.
- [240] J.R. Wright, C. Cartwright, D. Fura, F. Rajabipour, Fresh and hardened properties of concrete incorporating recycled glass as 100% sand replacement, *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(10) (2014) 04014073.
- [241] P. De Silva, F. Glasser, Hydration of cements based on metakaolin: thermochemistry, *Advances in Cement Research* 3(12) (1990) 167-177.
- [242] J.M. Khatib, R.M. Clay, Absorption characteristics of metakaolin concrete, *Cement and concrete Research* 34(1) (2004) 19-29.
- [243] T.-C. Ling, C.-S. Poon, S.-C. Kou, Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars, *Cement and Concrete Composites* 33(8) (2011) 848-854.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [244] H. Liu, J. Shi, H. Qu, D. Ding, An investigation on physical, mechanical, leaching and radiation shielding behaviors of barite concrete containing recycled cathode ray tube funnel glass aggregate, *Construction and Building Materials* 201 (2019) 818-827.
- [245] A. Tuaum, S. Shitote, W. Oyawa, Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate, *Buildings* 8(2) (2018) 15.
- [246] A.S. AS, *Concrete structures*, Standards Australia, Sydney (2001).
- [247] Standards Australia, *Method for Sampling and Testing Aggregates, Potential Alkali Silica Reactivity – Accelerated Mortar Bar Method (AS 1141.60.1-14)*, 2014. Retrieved from <<http://www.siaglobal.com>> 2015, 2015.
- [248] F. Rajabipour, H. Maraghechi, G. Fischer, Investigating the alkali-silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(12) (2010) 1201-1208.
- [249] M. Brouxel, The alkali-aggregate reaction rim: Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O and CaO chemical distribution, *Cement and Concrete Research* 23(2) (1993) 309-320.
- [250] C. Yuksel, R.S. Ahari, B.A. Ahari, K. Ramyar, Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate, *Cement and Concrete Composites* 38 (2013) 57-64.
- [251] P. Penacho, J. de Brito, A.S. Silva, M.R. Veiga, Risk of ASR in coating mortars incorporating glass aggregates and a Portland-limestone cement, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23(2) (2019) 226-244.
- [252] Q. Zhou, F.P. Glasser, Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 C, *Cement and Concrete Research* 31(9) (2001) 1333-1339.
- [253] M.-Z. Guo, Z. Chen, T.-C. Ling, C.S. Poon, Effects of recycled glass on properties of architectural mortar before and after exposure to elevated temperatures, *Journal of cleaner production* 101 (2015) 158-164.
- [254] R. Yan, S. Yang, M.-Z. Guo, C. sun Poon, Comparative evaluation of fire resistance of partition wall blocks prepared with waste materials, *Journal of cleaner production* 182 (2018) 156-165.
- [255] T.-C. Ling, C.-S. Poon, S.-C. Kou, Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites* 34(2) (2012) 265-272.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [256] M. Frías, The effect of metakaolin on the reaction products and microporosity in blended cement pastes submitted to long hydration time and high curing temperature, *Advances in cement research* 18(1) (2006) 1-6.
- [257] S. Mehdipour, I.M. Nikbin, S. Dezhampanah, R. Mohebbi, H. Moghadam, S. Charkhtab, A. Moradi, Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures, *Journal of Cleaner Production* (2020) 120126.
- [258] N.A. Shukri, R.N. Mohamed, M.Y. Ishak, S. Mansor, M.S.N. Mahmood, N. Azillah, F. Zamri, Effects of elevated temperature on high performance concrete incorporating of metakaolin and garnet, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2019, p. 012035.
- [259] C. Kahanji, F. Ali, A. Nadjai, Explosive spalling of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams under fire, *Journal of Structural Fire Engineering* (2016).
- [260] L.T. Phan, J.R. Lawson, F.L. Davis, Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and structures* 34(2) (2001) 83-91.
- [261] C.-S. Poon, S. Azhar, M. Anson, Y.-L. Wong, Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites* 25(1) (2003) 83-89.
- [262] M.S. Morsy, S.S. Shebl, Effect of silica fume and metakaoline pozzolana on the performance of blended cement pastes against fire, *Ceramics Silikaty* 51(1) (2007) 40.
- [263] A. Mohammed, A. Salih, H. Raof, Vipulanandan constitutive models to predict the rheological properties and stress–strain behavior of cement grouts modified with metakaolin, *Journal of Testing and Evaluation* 48(5) (2020).
- [264] M.I.C. Sousa, J.H. da Silva Rêgo, Mechanical Strength Analysis of Ternary Cement Pastes Containing Nanosilica and Metakaolin, *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*, Springer, 2020, pp. 59-67.
- [265] P. Awsarmal, R. Damgir, S.L. Hake, Investigation on Mechanical Properties of Metakaolin Added Steel Fibers Reinforced Concrete, *Techno-Societal 2018*, Springer2020, pp. 869-878.
- [266] J. Zuo, H. Li, B. Dong, L. Wang, Effects of metakaolin on the mechanical and anticorrosion properties of epoxy emulsion cement mortar, *Applied Clay Science* 186 (2020) 105431.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [267] R. Muduli, B.B. Mukharjee, Characteristics of Concrete Prepared with Metakaolin and Recycled Coarse Aggregates, *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering*, Springer2020, pp. 73-85.
- [268] S.F.U. Ahmed, Properties of concrete containing construction and demolition wastes and fly ash, *Journal of materials in civil engineering* 25(12) (2013) 1864-1870.
- [269] J. Xiao, J. Li, C. Zhang, Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cement and concrete research* 35(6) (2005) 1187-1194.
- [270] J. Kim, C. Yi, G. Zi, Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar, *Construction and Building Materials* 75 (2015) 242-246.
- [271] N. Singh, S. Singh, Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin, *Construction and Building Materials* 121 (2016) 400-409.
- [272] S.-C. Kou, C.-S. Poon, H.-W. Wan, Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates, *Construction and Building Materials* 36 (2012) 881-889.
- [273] M.C. Rao, S. Bhattacharyya, S. Barai, Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Materials and Structures* 44(1) (2011) 205-220.
- [274] A. Mardani-Aghabaglou, G.İ. Sezer, K. Ramyar, Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point, *Construction and Building Materials* 70 (2014) 17-25.
- [275] O. Kavitha, V. Shanthi, G.P. Arulraj, P. Sivakumar, Fresh, micro-and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete, *Applied Clay Science* 114 (2015) 370-374.
- [276] BIS, Indian standard non-destructive testing of concrete—Methods of test. Part 1: Ultrasonic pulse velocity, (1992).
- [277] A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan, K. Ramyar, Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates, *Materials and Structures* 48(8) (2015) 2629-2640.
- [278] M. Shekarchi, A. Bonakdar, M. Bakhshi, A. Mirdamadi, B. Mobasher, Transport properties in metakaolin blended concrete, *Construction and Building Materials* 24(11) (2010) 2217-2223.
- [279] E. Sellevold, F. Radjy, Condensed silica fume (microsilica) in concrete: water demand and strength development, *Special Publication* 79 (1983) 677-694.

- [280] A. Djerbi, Influence de l'endommagement mécanique sur la perméabilité au gaz et sur la diffusion des ions chlorure des bétons, Nantes, 2007.
- [281] Y. Benachour, C.A. Davy, F. Skoczylas, H. Houari, Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar, *Cement and concrete research* 38(6) (2008) 727-736.
- [282] C. Sun, B. Bai, Diffusion of gas molecules on multilayer graphene surfaces: Dependence on the number of graphene layers, *Applied Thermal Engineering* 116 (2017) 724-730.
- [283] J. Zhang, F. Bian, Y. Zhang, Z. Fang, C. Fu, J. Guo, Effect of pore structures on gas permeability and chloride diffusivity of concrete, *Construction and Building Materials* 163 (2018) 402-413.
- [284] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, K. Mermerdaş, Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin, *Materials and structures* 41(5) (2008) 937-949.
- [285] E. Badogiannis, S. Tsivilis, V. Papadakis, E. Chaniotakis, The effect of metakaolin on concrete properties, *International Congress on Challenges of Concrete Construction In Innovation and Development In Concrete Materials and Construction*. Sept. Edition, 2002, pp. 81-89.
- [286] J. Young, Review of the pore structure of cement paste and concrete and its influence on permeability, *Special Publication* 108 (1988) 1-18.
- [287] Y. Sun, R. Yu, Z. Shui, X. Gao, L. Zheng, D. Qian, J. Huang, A Metakaolin-Based Slurry Additive for Marine Concrete: Preparation and Properties Evaluation, *Journal of Testing and Evaluation* 48(3) (2020).
- [288] B. Krobba, M. Bouhicha, S. Kenai, L. Courard, Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and *Stipa tenacissima* microfibers plant, *Construction and Building Materials* 171 (2018) 950-959.
- [289] K. Kapoor, S. Singh, B. Singh, Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures, *Construction and Building Materials* 128 (2016) 67-76.
- [290] N. Otsuki, S.-i. Miyazato, W. Yodsudjai, Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, *Journal of materials in civil engineering* 15(5) (2003) 443-451.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [291] O. Kavitha, V. Shanthi, G.P. Arulraj, V. Sivakumar, Microstructural studies on eco-friendly and durable self-compacting concrete blended with metakaolin, *Applied Clay Science* 124 (2016) 143-149.
- [292] N. Singh, M. Mithulraj, S. Arya, Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self compacting concrete blended with metakaolin, *Resources, Conservation and Recycling* 144 (2019) 240-251.
- [293] P. Nuaklong, V. Sata, P. Chindaprasirt, Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens, *Construction and Building Materials* 161 (2018) 365-373.
- [294] C. Shi, J.A. Stegemann, R.J. Caldwell, Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results, *Materials Journal* 95(4) (1998) 389-394.
- [295] Z.Ç. Ulucan, K. Türk, M. Karataş, Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete, *Russian Journal of Nondestructive Testing* 44(5) (2008) 367-374.
- [296] A.A. Ramezani pour, E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani, F. Moodi, Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, *Cement and Concrete Composites* 31(10) (2009) 715-720.
- [297] C. Shi, A.F. Jiménez, A. Palomo, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement, *Cement and concrete research* 41(7) (2011) 750-763.
- [298] F. Azevedo, F. Pacheco-Torgal, C. Jesus, J.B. De Aguiar, A. Camões, Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and building materials* 34 (2012) 186-191.
- [299] M. Medine, Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage Des pneus usés, Département de Génie Civil, Université Djillali Liabès, Sdi Bel-Absse -Algérie, (2018).
- [300] F. Cassagnabère, M. Mouret, G. Escadeillas, P. Broilliard, A. Bertrand, Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects, *Construction and Building Materials* 24(7) (2010) 1109-1118.

# **ANNEXES**

## Annexe A : Exemple de calcul de la composition du béton

### ✂ Les données

Pour un volume de béton de volume  $V=33$  litres.

#### A. Masses volumiques

- Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) :  $\rho_G = 1373 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue du gravier :  $\rho_{AG} = 266 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2631 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3080 \text{ kg/m}^3$

#### B. Coefficients d'absorption

- Coefficient d'absorption du sable :  $A_{bs} = 0.75$  ;
- Coefficient d'absorption du gravier :  $A_{bG} = 3.2$  ;
- Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.5$  ;
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage :  $A=1\%$  du volume du béton ;
- Le rapport Eau/Ciment est de  $E/C_{\text{volume}}=1.26$  par unité de volume de ciment et  $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volume}} / \rho_C = 0.40$  par unité de poids de ciment ;
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) :  $\%Sp= 0.8\%$  du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** ;

### 🔗 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse  $M_1$  et un échantillon de gravier de masse  $M'_1$  et on les met dans l'étuve réglée à  $105^\circ\text{C}$  pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse  $M_2$  et  $M'_2$  les masses respectives du gravier et du sable.

- L'humidité du sable :  $\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$
- L'humidité du gravier :  $\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$

### 🔗 Calcul des différents composants

#### A. Gravier

La quantité  $G$  en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton  $V$  :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3) \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

#### B. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le

Le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume  $V$  de béton (S) :

- Le pourcentage du gravier dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

- Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

- Le pourcentage du sable dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S / M}{100}$$

- Quantité du sable **S** en (kg) pour un volume **V** de béton :

$$S(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

### C. Ciment

- Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

- Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \%P$$

- La quantité de ciment **C** en (kg) pour un volume **V** de béton :

$$C(\text{kg}) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

### D. Superplastifiant

- Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton **Sp** (kg/m<sup>3</sup>)

$$Sp(\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

- La quantité de superplastifiant **Sp** en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg / m^3) \times V$$

### E. Eau

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

- Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\% E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \% P$$

Le calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

- L'eau contenue dans le sable : e<sub>1</sub>

$$e_1(kg) = \frac{\% S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

- L'eau contenue dans le gravier : e<sub>2</sub>

$$e_2(kg) = \frac{G(kg / m^3) \times V}{1000} \left( \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

- L'eau contenue dans le superplastifiant : e<sub>3</sub>

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

- L'eau à extraire: e

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(kg) = \frac{\% E \times 10 \times V}{1000} - e$$

## Annexe B: Agitateurs à hélice électroniques Heidolph RZR 2102 control Z

### D.1 Description

Le Heidolph RZR 2102 control Z est un agitateur à tige à deux gammes de vitesse de rotation (Niveau I : 4– 108 t/min et Niveau II : 17 – 540 t/min). Il est équipé d'un moteur à condensateur, parfait pour mélanger des milieux à haute viscosité. Il assure une vitesse constante sur la totalité de la plage, même en cas de variation de la viscosité et en mode de surcharge. Les changements de viscosité peuvent être contrôlés à l'aide de l'affichage LED. Réglage et contrôle numériques de la vitesse et du couple. Il possède des engrenages planétaires à bride (rapport d'engrenage 4:1). Le bras est compatible avec les éléments d'agitation dotés de tiges pouvant atteindre 10 mm de diamètre.



## D.2 Données techniques

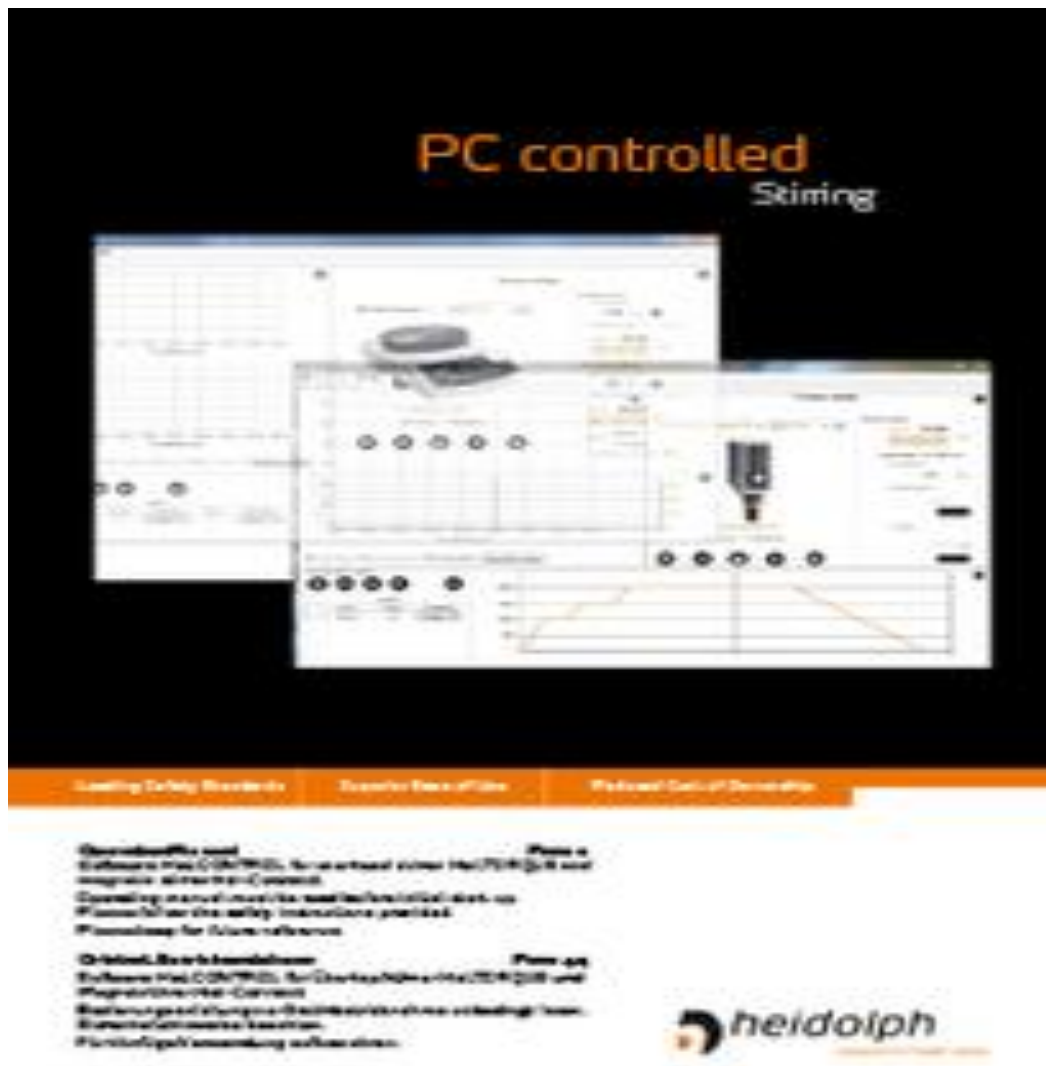
<b>DONNEES TECHNIQUES</b>	
Puissance absorbée (charge nominale)	RZR 2020 / 2021 P = 50 W
Puissance absorbée (charge nominale)	RZR 2041 P = 70 W
Puissance débitée Moteur	RZR 2020 / 2021 P = 50 W
Puissance débitée Moteur	RZR 2041 P = 100 W
Dimensions (en mm) RZR 2020 / 2021	Largeur 82 ; hauteur 206 ; profondeur 176
Dimensions (en mm) RZR 2041	Largeur 82 ; hauteur 211 ; profondeur 176
Poids RZR 2051 control	3 kg
Poids RZR 2102 control	3,8 kg
Température de service	0 – 40 °C
Température de stockage	- 20 à + 80 °C
Humidité de l'air relative	95 % (sans humidification)
Protection	IP 40
Couple	Voir courbes caractéristiques ci-dessous
Gamme de vitesse de rotation	40 – 2000 rpm Niveau I : 40 – 400 rpm Niveau II : 400 – 2000 rpm
Raccord pour pale de l'agitateur	Mandrin 10,5 mm, arbre de sortie avec trou pour arbre d'agitation avec $\varnothing$ jusqu'à 10 mm
Fixation de l'agitateur	Barre de fixation 13 mm
Protection du moteur	Un dispositif de protection contre les surchauffes met automatiquement le moteur hors service dans le cas d'une surcharge persistante (diode d'alarme rouge); bouton-poussoir de redémarrage ON/OFF.
Lampe témoin pour «Appareil en marche»	témoin (vert)
Protection de l'arbre d'agitation	Montage du dispositif de protection de l'arbre d'agitation possible (accessoire)
Antiparasite	Selon EN 50081
Mode de service	Régime permanent
Affichage RZR 2021 et RZR 2041	Affichage à cristaux liquides à 4 chiffres, hauteur des chiffres 8 mm
Affichage gamme de mesure	40 – 2000 rpm
Résolution	1 rpm
Précision de la valeur affichée	+/- 01 de la valeur finale
Principe de mesure	Capteur à effet Hall avec aimant torique

## Annexe C : logiciel d'acquisition « Hei-control V2.01 »

Hei-control est un logiciel développé par la société Heidolph pour l'acquisition et le contrôle des données de mesure des agitateurs de la série RZR et Hei-TORQUE.

Le «Hei-Control Software» fournit les fonctions suivantes :

- Définir et sécuriser les paramètres de processus individuels.
- Cycles de processus de sauvegarde et de lecture.
- Programmer et sauvegarder les profils de vitesses.
- Définir un compte à rebours ou une minuterie.
- Contrôlez jusqu'à quatre appareils simultanément.



Annexe D: Résumé graphique de la thèse

## Remplacement de verre TRC comme granulat



# **PRODUCTION SCIENTIFIQUE**

✓ PUBLICATIONS INTERNATIONALES

- ✍ Younes Ouldkaoua et al. *Effect of using metakaolin as supplementary cementitious material and recycled CRT funnel glass as fine aggregate on the durability of green self-compacting concrete*. **Construction and Building Materials** 235 (2020): <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117802>.
- ✍ Younes Ouldkaoua et al. *Rheological properties of blended metakaolin self-compacting concrete containing recycled CRT funnel glass aggregate*. **Journal of Silicate Based and Composite Materials** 71 (2019): <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.27>.
- ✍ Younes Ouldkaoua et al. *Experimental study on the reuse of cathode ray tubes funnel glass as fine aggregate for developing an ecological self-compacting mortar incorporating metakaolin*. **Journal of Building Engineering** 27 (2020): <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100951>

✓ COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

- ✍ Younes Ouldkaoua et al. *Fresh and hardened properties of self compacting mortar made with waste CRT funnel glass as fine aggregate and metakaolin as supplementary cementitious material*: **Séminaire international de Génie Civil « SIGC 2018 » ENPO-MA 27&28 Novembre 2018, Oran-Algérie**. [ENPO-MA 27&28 Novembre 2018, Oran-Algérie](#).

✓ COMMUNICATIONS NATIONALES

- ✍ Younes Ouldkaoua et al. *Effet du verre des tubes cathodiques (TRC) sous forme granulats fin et de métakaolin sur les à l'état frais des bétons autoplaçants* : **Séminaire national de Génie Civil « ICE 2018 » ENPO-MA 27&28 Décembre 2018, Jijel-Algérie** » [ENPO-MA 27&28 Décembre 2018, Jijel-Algérie](#) »

✎ Younes Ouldkhaoua et al. *Use of metakaolin powder and cathode ray tube waste as fin aggregate in self-compacting mortar* : [1ère Journée Doctorale de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture, 14 Mai 2018, Laghouat.](#)