UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

THÈSE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux innovants pour la construction durable

Elaboration des nouveaux matériaux de construction biosourcés à base des déchets industriels

---

Par :

Mr. HADJADJ Moussa

Devant le jury composé de:

Mr.BOUKENDAKDJI Othmane	Professeur	Université de Médéa	Président
Mr.DEBIEB Farid	Professeur	Université de Médéa	Examinateur
Mr.SI- AHMED Mohamed	MCA	Université de Blida	Examinateur
Mr. GUENDOUZ Mohamed	MCA	Université de Médéa	Directeur de thèse
Melle. BOUKHELKHAL Djamila	MCA	Université de Médéa	Co-directeur de thèse

Soutenue le : 28/11/2024

DEDICACE

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

J*e dédiée 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* ***NAIMA****.*

À *mon très cher père* ***MOHAMED****, 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 crées le milieu favorable, l'ambiance joyeuse et l'atmosphère joviale pour mon procuré ce travail, mes chers frères à dieu :*

RABAHI Z, TOUMI Y, OUARED M, MRABAT O, GUATIOUI M et HASNAOUI H

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.*

T*outes ces personnes que j'ai senties redoutables de leur dédier ce modeste travail en termes d'amour et de profonde gratitude.*

REMERCIEMENTS

(وما أوتيتم من العلم إلا قليلا) صدق الله العظيم

***P**remièrement et avant tout, louange à dieu Allah le tout puissant, qui m'a accordé la force, l'énergie, le courage, l'endurance et la volonté pour l'accomplissement de ce travail.*

***M**es remerciements les plus chaleureux vont plus particulièrement à mon directeur de thèse, Monsieur **GUENDOUZ Mohamed**, Maître de conférences A à l'Université de YAHIA FARES-MEDEA, pour ses efforts, ses orientations ainsi que la qualité du travail qu'il m'a inculqué, pour m'avoir suivi avec patience et intérêt dans mon projet, et pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Sans oublier son temps précieux ainsi que sa disponibilité permanente, sa contribution primordiale et ses idées originales qui ont servi à enrichir le contenu de cette thèse.*

***J**e tiens également à remercier mon co-directeur de thèse, Melle **BOUKHALKHAL Djamila**, Maître de conférences A et chef de département de Génie Civil à l'Université de YAHIA FARES-MEDEA, pour sa disponibilité et ses précieux conseils, ses encouragements et son assistance scientifique qui ont contribué à l'avancement de ce travail, malgré leur multiple occupation.*

***J**e tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **BOUKENDAKDJI Othmane**, Professeur à l'Université de YAHIA FARES - MEDEA pour avoir accepté de présider le jury d'examen de cette thèse. Je remercie également Monsieur **DEBIEB Farid**, Professeur à l'Université de YAHIA FARES - MEDEA, et Monsieur **SI-AHMED Mohamed**, Maître de conférence A à l'Université de Blida, pour l'honneur qui m'ont fait d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir consacré de leur temps à la lecture de cette thèse.*

***J**'adresse mes vifs remerciements, au département de Génie Civil de l'université, YAHIA FARES de MEDEA, à leurs personnels, et à toute personne ayant contribué au bon déroulement de ce travail.*

REMERCIEMENTS

J*e tiens à remercier tous les membres du laboratoire pédagogique du Génie Civil qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de mon travail. Toute ma reconnaissance à tous mes amis et mes collègues sans avoir oublié tous mes anciens maitres et professeurs de tous les niveaux.*

J*e remercie également Laboratoire de Recherches CRAPC 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 appareillage nécessaires.*

ملخص

بفضل الابتكارات التكنولوجية، تشكل الخرسانة الرملية السائلة (خ.ر.س) من الناحية التقنية ثورة في مجال البناء. تكمن خصوصية هذا النوع من 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 الملدنات الفائقة ,مما يؤدي إلى زيادة تكلفة الخرسانة المرصوصة ذاتيا وانبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون في البيئة. في الوقت الحاضر، أصبحت المنتجات الثانوية البحرية والنفايات الصناعية في تزايد مستمر وفقا لاحتياجات 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 مع التركيز على الجوانب البيئية كهدف مهم.

الهدف من هذا العمل هو دراسة التأثير المشترك لمسحوق المحار كإضافة أسمنتية بنسبة 5%،10%و % 15 من وزن الإسمنت ونفايات الجرانيت كبديل للرمل بنسبة 10%،20%،30%،40% و % 50 من وزن الرمل من أجل الحصول على خرسانة رملية إيكولوجية واقتصادية سائلة. أظهرت النتائج التجريبية أن إضافة مخلفات الجرانيت ومسحوق المحار إلى الخرسانة الرملية السائلة أعطى نتائج مقبولة للخصائص الريولوجية, وهذا التحسين مفيد للتخفيف من التأثير السلبي لمخلفات الجرانيت على تدفق خ.ر.س.بالنسبة للحالة الصلبة، لاحضنا تحسنا للخصائص الميكانيكية مع إضافة مايصل إلى 10% من مسحوق ألمحار و 50% من نفايات الجرانيت المستعملة .

أما بخصوص ديمومة الخرسانة الرملية السائلة، فقد أدى الاستبدال الجزئي للأسمنت بمسحوق المحار والرمل الطبيعي بواسطة مخلفات الجرانيت إلى تقليل المسامية وامتصاص الماء ونفاذية أيونات الكلوريد في خ.ر.س. زيادة على ذلك، أدت إضافة مخلفات الجرانيت إلى التقليل م ن الآثار السلبية للرمل الطبيعي فيما يتعلق بتفاعلات السيليكا القلوية للخرسانة الرملية السائلة .من ناحية أخرى،أدت إضافة مسحوق المحار و رمل الجرانيت إلى تحسين مقاومة خ.ر.س ضد البيئات العدوانية مثل هجمات الأحماض والكبريتات، والتعرض لدرجات الحرارة المرتفعة ودورات التجميد/الذوبان.أخيرًا،ومن وجهة نظر بيئية،فإن استخدام مزيج نفايات الجرانيت و مسحوق ألمحار في مخاليط خ.ر.س يمكن أن يساهم بشكل إيجابي في تكنولوجيا الخرسانة البيئية المستخدمة في قوانين البناء العامة.

الكلمات المفتاحية :الخرسانة الرملية السائلة، مسحوق المحار، مخلفات الجرانيت، ريولوجيا، المقاومة الميكانيكية ، الديمومة، التأثير البيئي.

RÉSUMÉ

Avec les innovations technologiques, le béton de sable fluide (BSF) représente une révolution du point de vue technique dans le domaine de la construction. La particularité de ce type de béton apparaît dans ses propriétés à l'état frais, il se caractérise par une grande fluidité et stabilité. Pour répondre à ces exigences, la conception du BSF nécessite l'utilisation d'un dosage de liant élevé et des superplastifiants (SP). Ceci peut engendrer l'augmentation de son coût de production et l'émission de CO_2 dans l'environnement. De nos jours, le secteur du génie civil s'est tourné vers le développement durable en mettant l'accent sur les aspects environnementaux comme un objectif important. En outre, les sous-produits marins et les déchets industriels augmentent en même temps que les besoins publics augmentent, ce qui accroît la charge environnemental.

La présente recherche a pour but d'étudier l'effet combiné de la poudre de coquillage (PC) comme ajout cimentaire à des taux de substitution de 5%, 10% et 15% par rapport aux poids du ciment et des déchets de granite (DG) comme granulats fins (sable de granite(SG)) à des niveaux de substitution de 10%,20%,30%,40% et 50% par rapport aux poids du sable naturel pour la mise au point d'un béton de sable fluide écologique et économique (Eco-BSF). Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de la PC au DG dans les BSF a donné un effet bénéfique pour atténuer l'effet négatif du DG sur la fluidité des BSF en présentant des propriétés rhéologiques acceptables. À l'état durci, les propriétés mécaniques des BSF sont améliorées avec l'ajout de jusqu'à 10% de PC et 50 % de DG.

En terme de durabilité, le remplacement partiel du ciment par la PC et du sable naturel par le DG a diminué la porosité, l'absorption d'eau et la perméabilité aux ions chlorure du BSF. De plus, la substitution du DG a minimisé l'effet négatif du sable naturel vis-à-vis des réactions alcalis silice (RAS) des BSF. D'autre part, l'ajout de la PC avec le DG a amélioré la résistance du BSF contre les environnements agressifs tels que les attaques par les acides et les sulfates, l'exposition aux hautes températures et aux cycles de gel/dégel. Enfin, et du point de vue environnemental, l'utilisation de la combinaison du DG et de la PC dans les mélanges de BSF peut contribuer positivement à la technologie des éco-bétons utilisée dans les codes généraux de la construction.

Mots clés : Béton de sable fluide ; Poudre de coquillage ; Déchets de granite ; Rhéologie ; Résistance mécanique ; Durabilité ; Impact environnemental.

ABSTRACT

Thanks to technological innovations, flowable sand concrete (FSC) represents a revolution from a technical point of view in the field of construction. The special feature of this type of concrete appears in its properties in the fresh state, which is characterized by high fluidity and stability. To meet these requirements, the design of FSC requires the use of a high dosage of binder and superplasticizers (SP). This can lead to an increase in its production cost and the emission of CO_2 into the environment. Today, the civil engineering sector has turned towards sustainable development by emphasizing environmental aspects as an important objective. In addition, marine by-products and industrial waste are increasing at the same time as public needs are growing, which increases the environmental burden.

The aim of the present research is to study the combined effect of seashell powder (SSP) as a supplementary cementing material (SCM) at substitution levels of 5%, 10% and 15% relative to the weight of cement and granite waste (GW) as fine aggregate (granite sand (GS)) at substitution levels of 10%, 20%, 30%, 40% and 50% relative to the weight of natural sand for the development of an ecological and economical flowable sand concrete (Eco-FSC).The experimental results showed that the addition of SSP to GW in FSC gives a beneficial effect in mitigating the negative effect of GW on the flowability of FSC by exhibiting acceptable rheological properties. In the hardened state, the mechanical properties of the FSCs are improved with the addition of up to 10% SSP and 50% GW.

In terms of durability, the partial replacement of cement by SSP and natural sand by GW decreased the porosity, water absorption and chloride ion permeability of FSC. Moreover, the substitution of GW minimized the negative effect of natural sand on the alkali-silica reactions (ASR) of FSC. On the other hand, the addition of SSP with GW improved the resistance of FSC against aggressive environments such as acid and sulfate attacks, exposure to high temperatures and freeze-thaw cycles. Finally, and from the environmental point of view, the use of the combination of GW and SSP in FSC mixtures can contribute positively to the eco-concrete technology used in general building codes.

Key words: Flowable sand concrete; Seashell powder; Granite wastes; Rheology; Mechanical strength; Durability; Environmental impact.

TABLE DES MATIERES

Remerciements……. **I**

Résumé…….. **III**

Table des matières…… **XI**

Liste des figures…… **X**

Liste des tableaux…….. **XIX**

Liste des Abréviations…….. **XXI**

INTRODUCTION GÉNÉRALE…..……..…….... **1**

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION…….……..... **5**

I.2.GÉNÉRALITÉ SUR L'INDUSTRIE DU BETON DE SABLE ……..……... **6**

I.2.1. Le béton de sable…… **6**

I.2.2. Histoire sur le béton de sable…….…… **7**

I.2.3. Les constituants d'un béton de sable ……..……..……... **9**

I.2.4. Propriétés générales de béton de sable …… **14**

I.2.4.1.Maniabilité……. **15**

I.2.4.2.Granulométrie…… **16**

I.2.4.3.Résistance à la compression...……..... **17**

I.2.5. Propriétés spécifiques……..... **21**

I.2.6. Formulation de béton de sable ……..…….…….. **24**

I.2.7. Le béton de sable fluide…… **25**

I.2.8.Exemples d'applications des béton de sable fluide …….…..... **27**

I.2.8.1.Exemples d'applications des bétons de sable fluide en l'Algérie…….…… **29**

I.3.VALORISATION DE DECHETS DE COQUILLAGE COMME ÉCO-MATERIAUX CIMENTAIRE DANS L'INDUSTRIE DU BETON…….. **30**

I.3.1.Environnement et ressources…….……..... **30**

I.3.2.La construction durable…….…….…….. **33**

I.3.3.Les éco-matériaux …….…….…..... **34**

I.3.4.Valorisation des déchets…….... **36**

I.3.4.1. Définition de déchets…… **37**
I.3.4.2. Classification des déchets……. **38**
I.3.4.2.1.Classement selon l'origine et l'activité du déchet…….…….. **38**
I.3.5. Environnemental des déchets……..... **39**
I.3.5.1. Production de ciment dans le monde et son émission de CO_2……..…….. .. **40**
I.3.5.2. Production de ciment en l'Algérie et son émission de CO_2…… **43**
I.3.6.Valorisation de déchets de coquillages comme ajout cimentaire dans le béton…… **44**
I.3.6.1. Déférent type de coquillages……..... **46**
I.3.6.2. Obtention de la poudre de coquillages…….. **47**
I.3.7. Effet de la poudre de coquillages sur l'état frais du béton……..... **49**
I.3.7.1.Effet sur l'ouvrabilité et le temps de prise…….. **49**
I.3.8. Effet de la poudre de coquillages sur l'état durci du béton……... **53**
I.3.8.1. Résistance à la compression…….. **53**
I.3.8.2. Résistance à la traction par flexion……..... **56**
I.3.8.3. Densité……... **58**
I.3.8.4. Module d'élasticité……. **59**
I.3.8.5. Influence de la poudre de coquillage sur la durabilité des bétons……..... **59**
I.4. VALORISATION DE DECHETS DE GRANITE COMME MATERIAUX GRANULAIRES DANS L'INDUSTRIE DU BETON……. **63**
I.4.1.Production des granulats…… **64**
I.4.1.1.Production des granulats dans le monde…….. **64**
I.4.2.2.Production des granulats en Algérie……... **65**
I.4.2.Contexte environnemental des matériaux granulaires…… **67**
I.4.3.Généralités sur les matériaux granulaires……..... **68**
I.4.3.1. Définitions……. **68**
I.4.3.2.Importances des matériaux granulaires ……..…… **69**
I.4.4.Origine des granulats ……. **70**
I.4.4.1.Principales ressources des granulats…… **70**
I.4.5. Béton à base des granulats de déchets de granite recyclés……... **72**
I.4.5.1.Le granite……. **72**

I.4.5.2.Source de granite…….. **72**
I.4.5.3.Propriétés de granite…… **73**
I.4.5.4.Production mondiale de granite..……..…….. **76**
I.4.5.5.Production de granite en l'Algérie……..... **77**
I.4.5.6.Recyclage de déchets de granite dans le monde…….…… **78**
I.4.5.7.Recyclage de déchets de granite en l'Algérie……..... **78**
I.4.6. Effet de granulats de granite sur l'état frais du béton…….. **79**
I.4.6.1.Influence de granulats de granite sur l'ouvrabilité…….. **79**
I.4.7. Effet de granulats de granite sur l'état durci du béton……. **81**
I.4.7.1.Influence de granulats de granite sur les résistances mécaniques……. **81**
I.4.7.2.Influence de granulats de granite sur les propriétés de durabilité des bétons **91**
I.5. CONCLUSION ……..…… **98**

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1 INTRODUCTION…… **99**
II.2. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS……... **99**
II.2.1. Ciment…….……. **99**
II.2.2. Filler de marbre…….…….…….. **100**
II.2.3. Poudre de coquillage……..…….. **102**
II.2.4. Sable…….……..…….. **106**
II.2.5. Adjuvant ……...…….…….…..... **109**
II.2.6. Eau de gâchage…….……..... **109**
II.2.7. Déchets du granite …….…….…….... **109**
II.3. FORMULATION ……..... **111**
II.3.1.Formulation du BSF…….. **112**
II.4. PROCEDURE DE MALAXAGE…… .. **114**
II.5. ESSAIS SUR BSF À L'ÉTAT FRAIS ……..... **115**
II.5.1. Essais du temps de prise par Vicat……..... **115**
II.5.2. Essais de l'étalement au Mini-Cône ……... **115**

II.5.3. Essai de l'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel) …… **116**
II.6. ESSAIS SUR BSF À L'ÉTAT DURCI ……..... **116**
II.6.1. Résistance à la compression ……..……..... **116**
II.6.2. Résistance à la traction par flexion…….……..…….. **117**
II.6.3.Essai de vitesse d'auscultation ultrasonique (VAS)…….……. **117**
II.6.4.Module d'élasticité …….…….……. **118**
II.6.5.Résistance à l'abrasion……..... **119**
II.6.6. Essai de la conductivité thermique…….……. **120**
II.6.7. Résistance à haute température……. **121**
II.6.8. Essai de la porosité accessible à l'eau…….… **122**
II.6.9. Absorption d'eau par immersion totale …….……. **123**
II.6.10. Absorption d'eau par capillarité……..... **124**
II.6.11. Essai de résistances aux cycles gel/dégel ……. **124**
II.6.12. Essai d'attaque par des acides……..... **126**
II.6.13. Essai d'attaque par des sulfates…….……. **127**
II.6.14. Réaction alcali silice…….…….. **128**
II.6.15. Essai de résistivité électrique…….……... **128**
II.6.16. Essai de perméabilité aux ions chlorures ……..….... **130**
II.6.17. Essai d'analyse microstructurales……..…… **131**
II.6.17.1. Essais d'analyse par microscope électronique à balayage (MEB)..... **131**
II.6.17.2. Essais d'analyse par diffraction des rayons X (DRX)……. **132**
II.6.17.3. Essais d'analyse thermogravimétrique (ATG/ATD)…….. **132**
II.7. CONCLUSION……. **133**

CHAPITRE III

COMPORTEMENT DES BSF À L'ÉTAT FRAIS

III.1. INTRODUCTION …….. **134**
III.2. FORMULATION DES BSF …….. **134**
III.2.1. Optimisation du rapport SP/L……..……. **134**
III.2.2. Effet du dosages en superplastifiant sur les BSF ……..…… **136**
III.2.2.1. Étalement au mini-cône …….……. **136**

III.2.2.2. Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V (V-funnel)……. **139**
III.3. Effet de PC et du SG sur la fluidité des BSF…….…… **141**
III.3.1. Effets de PC sur le temps de prise au Vicat…… **141**
III.3.2. Étalement au mini-cône……..... **142**
III.3.3. Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V (V-funnel)……..... **144**
III.3. CONCLUSION …….. **147**

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT DES BSF À L'ETAT DURCI

IV.1. INTRODUCTION …….……..... **148**
IV.2. EFFET DE SG ET LA PC SUR LE COMPORTEMENT DES BSF À L'ETAT DURCI…….…… **148**
IV.2.1. Résistance à la compression…….…… **148**
IV.2.2. Résistance à la flexion……...… **152**
IV.2.3. Vitesse d'auscultation ultrasonique…….…… **154**
IV.2.4. Module d'élasticité…….…….. **156**
IV.2.5. Porosité accessible a l'eau…….……. **158**
IV.2.6. Absorption d'eau…….…….. **160**
IV.2.7. Résistivité électrique……..... **164**
IV.2.8. Conductivité thermique……. **163**
IV.2.9. Résistance à l'abrasion……..... **167**
IV.2.10. Résistance à haute température……. **169**
IV.2.10.1. Perte de résistance à la compression……..... **169**
IV.2.10.2. Perte de masse…….……..... **171**
IV.2.10.3. Examen visuel…….……..... **174**
IV.2.11. Résistance au gel-dégel…….…….. **176**
IV.2.11.1. Perte de masse et perte de résistance à la compression…….…… **176**
IV.2.12. Réaction alcali silice…….…….... **181**
IV.2.13. Pénétration aux ions chlorures…….…… **185**
IV.2.14. Résistance aux attaque d'acide……. **186**

IV.2.14. 1.Perte de masse ……. **187**

IV.2.14. 2.Perte de résistance……. **189**

IV.2.14. 3.L'examen visuel ……. **191**

IV.2.15.Résistance aux attaque du sulfate……. **192**

IV.2.15. 1.Perte de masse ……. **192**

IV.2.15. 2.Perte de résistance……. **194**

IV.2.15. 3. L'examen visuel……. **195**

IV.3. ANALYSE MICROSTRUCTURAL DES BSF……. **196**

IV.3.1. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)……. **196**

IV.3.2. Analyses thermogravimétrique et thermique différentielle (ATG/ATD)…….. **198**

IV.4. CORRELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DU BSF À L'ETAT DURCI **201**

IV.4.1. Corrélation entre la résistance à la compression et VAS……..... **201**

IV.4.2. Corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité…… **202**

IV.4.3. Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité…….…… **203**

IV.4.4. Corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration aux ions chlorures…… **204**

IV.4.5. Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité…….……... **205**

IV.4.6. Corrélation entre l'absorption d'eau par immersion total et la porosité…….... **206**

IV.4.7. Corrélation entre la résistivité électrique et la porosité……..... **207**

IV.4.8.Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la résistivité électrique……. **208**

IV.5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BSF…….. **209**

IV.6. CONCLUSION …… **219**

CONCLUSION GÉNÉRALE ……..…….... **220**

Perspectifs…….. **223**

References bibliographique……. **224**

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

***Figure I.1**:Phare de port Saïd réalisé en béton du sable Coignet (Egypte)*…….. **8**

***Figure I.2** : Fines anguleuses*…… **11**

***Figure I.3** : Fines sphériques*…….. **11**

***Figure I.4** : Effet de filler*…… **12**

***Figure I.5** : Microstructure du fumé de silice (forme sphérique)*……... **13**

***Figure I.6** : Influence de la nature du sable sur la maniabilité*…….. **16**

***Figure I.7** : Influence de la granulométrie du sable sur la maniabilité d'un BSF*……. **17**

***Figure I.8** : Influence de la granularité sur la résistance à la compression*…….....…… **18**

***Figure I.9** :Influence de la granularité en fonction d'ajout du filler calcaire sur la résistance à la compression*…….. **19**

***Figure I.10** :Variation des résistances mécanique en fonction du type de sable* **20**

***Figure I.11** :Effets du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression du béton de sable*..... **20**

***Figure I.12** :Influence de la nature de l'addition sur la résistance à la compressions du béton de sable* **21**

***Figure I.13** : Variation de la résistances à la traction par fendage du béton de sable*..... **22**

***Figure I.14** : Retrait d'auto-dessiccation*……..……... **23**

***Figure I.15** :Retrait total*……. **23**

***Figure I.16** :Aspect sur la microstructure du béton de sable*…… **23**

***Figure I.17** :Organigramme de la méthode de la formulation théorique du béton de sable*…….... **25**

***Figure I.18** : Dallage en béton de sable fluide (Base aérien de Dijon)*…….. **28**

***Figure I.19** :Les trois piliers du développement durable*……... **33**

***Figure I.20** :Déchets marins jetés dans une carrière à Huarmey (Pérou)*……. **38**

***Figure I.21**:Comparaison entre la production de ciment et l'acier par année*…….. **40**

***Figure I.22**:Développement du marché mondial du ciment*……... **41**

***Figure I.23**: Émission de CO_2 à due à la production du ciment*……. **41**

***Figure I.24**:Localisation de la production du ciment en Algérie*……... **42**

LISTE DES FIGURES

Figure I.25:*Types de coquillages : coquilles d'huîtres (a), coquilles de sanguine (b), coquilles de moules (c), coquilles Saint-Jacques (d) et coquilles de Palourde (e)*..... **46**

Figure I.26:*Processus de collecte des coquillages*……. **47**

Figure I.27:*Préparation de la poudre de coquillage (c) par broyage (a) et tamisage de la poudre obtenue (b) avec un tamis de 63 µm*……. **47**

Figure I.28:*Poudre de coquillage avant calcination (A) et après calcination (B) à 1000 °C*……... **48**

Figure I.29:*Effet de la PC sur l'ouvrabilité du béton*…… **49**

Figure I.30:*Effet de la PC sur le temps de prise initial et final du béton*……... **49**

Figure I.31:*Effet de la PC sur le temps de prise initial et final du béton*..... **50**

Figure I.32:*Effet de la PC sur le temps de prise initial et final du béton contenant 4% de poudre de coquilles dans le ciment*……..... **53**

Figure I.33:*Variation de la résistance à la compression des mortiers à base de la poudre de coquillage (palourde)*…… **53**

Figure I.34:*Coquilles de palourde broyées (Anadara Granosa)*……... **54**

Figure I.35:*Variation de la résistance à la traction du béton ordinaire à base de la poudre de coquillage (palourde)*…… **56**

Figure I.36:*Résumé des résultats de la résistance à la flexion en comparaison avec les mélanges de contrôle*……. **57**

Figure I.37:*Variation de la masse volumique du béton ordinaire et du béton aux poudre de coquilles*…… **58**

Figure I.38:*Variation de la densité du béton de cendres de coquilles de palourde*…….. **58**

Figure I.39:*Variation de la porosité et a d'eau et des mélanges de béton à partir de nombreuses études*…….. **60**

Figure I.40:*Résultats du test d'absorption*…….. **61**

Figure I.41:*Pénétration des ions chlorure*……..... **62**

Figure I.42:*Consommation de granulats pour quelques ouvrages types*……... **64**

Figure I.43:*Production mondiale des granulats en 2008*……... **65**

Figure I.44:*Evolution de la production des agrégats période 2000–2009*……..... **66**

LISTE DES FIGURES

Figure I.45*:Production des agrégats (M3) : année 2009, 10 wilayas les plus productrices*…….... **66**

Figure I.46*: Les impacts de l'extraction du sable sur l'environnement*……. **68**

Figure I.47 *:Les agrégats (granulats : sable, gravier, etc.)*…….... **70**

Figure I.48*:Gisement de granulats naturel (Sable d'oued souf)*……..... **70**

Figure I.49 *:Carrière de granulats artificiel*…….. **71**

Figure I.50 *:Matériaux recyclés*…… **71**

Figure I.51*:Roche plutonique magmatique de granite (Kef Bouacida-Annaba, Algérie)*…… **73**

Figure I.52*:Exemples de granite de couleurs différentes*……... **74**

Figure I.53*:Texture de granite*……... **75**

Figure I.54*:Le granite orbiculaires*…… **76**

Figure I.55*:Pourcentage par pays des importations de granite par les États-Unis en 2013*……. **77**

Figure I.56*:Recyclage de déchets de granite dans les matériaux de construction dans différents pays*…….. **78**

Figure I.57*:Effet du niveau de remplacement de granulats de granite sur la variation de l'ouvrabilité de bétons*…… **79**

Figure I.58*:Pourcentage optimal de remplacement proposé par divers chercheurs pour une résistance maximale à la compression*……..... **83**

Figure I.59*:Résistance à la compression des BAP modifiées par le déchet de granite*..... **84**

Figure I.60*:Résistance à la compression des échantillons de bétons à base de GG*…..... **85**

Figure I.61*:Effet du niveau de remplacement de granulats de granite sur la variation de la résistance à la traction de bétons*……..... **86**

Figure I.62*:Pourcentage optimal de remplacement proposé par divers chercheurs pour une résistance maximale à la flexion*……... **86**

Figure I.63*:Valeurs de résistance à la flexion des échantillons SCC avec différents pourcentages de déchets de coupe de granite*…… **87**

Figure I.64*:Distribution granulométrique des déchets de coupe de granite*……..... **89**

Figure I.65*:Images au microscope électronique à balayage déchets de coupe de granite*…… **90**

LISTE DES FIGURES

Figure I.66*:Abrasion de divers mélanges de béton (profondeur de l'usure en fonction de la teneur en GW)*…… **92**

Figure I.67*:Effet du substitution de déchets de granite sur l'absorption d'eau*…… **94**

Figure I.68*:Pourcentage optimal de remplacement proposé par divers chercheurs pour une absorption d'eau minimale*……..... **94**

Figure I.69*:Effet du niveau de la substituions de déchets de granite sur la pénétration des ions chlorure*…… **96**

Figure I.70*:Effet du niveau de remplacement sur la résistance au sulfate*…… **97**

Figure II.1 *: MEB observation du ciment*…….. **99**

Figure II.2 *:Filler de la poudre de marbre*……..... **100**

Figure II.3 *:Répartition granulaire du ciment, PM et PC*……. **101**

Figure II.4 *: Analyse minéralogique par DRX de PM*……... **101**

Figure II.5 *: MEB observation de PM*……... **102**

Figure II.6 *: Les procédures de préparation de la poudre de coquillage*…….. **103**

Figure II.7 *: Analyse minéralogique par DRX de PC*…… **104**

Figure II.8 *: MEB observation de PC*…… **104**

Figure II.9 *: Analyse par TGA/DSC de PC*……... **105**

Figure II.10 *:Aspect général du sable naturel utilisé*…… **106**

Figure II.11*:MEB observation du sable naturel utilisé*……..... **106**

Figure II.12 *: Analyse minéralogique par DRX du sable naturel utilisé*……... **107**

Figure II.13 *:Analyse granulométrique des granulats fin utilisée*……. **107**

Figure II.14 *: MEDAFLOW 30*…….. **109**

Figure II.15 *: Les procédures de préparation du SG*……. **110**

Figure II.16 *:MEB observation du SG*..... **110**

Figure II.17 *: Analyse minéralogique par DRX du SG*…….. **111**

Figure II.18*: Séquence de malaxage de BSF*……. **114**

Figure II.19*: Temps de pris de mélanges de BSF*…….. **115**

Figure II.20*: Etalement de mélanges de BSF*…… **115**

Figure II.21*: Temps d'écoulement de mélanges de BSF*……..... **116**

Figure II.22 *:Diapositif de l'essai de résistance à la compression*……..... **117**

Figure II.23 *:Diapositif de l'essai de résistance à traction par flexion*……. **117**

LISTE DES FIGURES

Figure II.24 *: Mesure de la vitesse d'auscultation sonique*…….. **118**

Figure II.25 *:Mesure du module d'élasticité*…….. **119**

Figure II.26 *:Diapositif de l'essai de la résistance à l'abrasion*……... **119**

Figure II.27 *:Diapositif de l'essai de la conductivité thermique*……... **120**

Figure II.28 *: Echauffement des échantillons dans un four à moufle*…… **121**

Figure II.29 *:Courbes temps-température pour différentes températures*……. **122**

Figure II.30 *:Essai de porosité accessible à l'eau*…….. **123**

Figure II.31 *:Essai d'absorption d'eau par capillarité*…….. **124**

Figure II.32 *:Essai de résistance au gel-dégel*……... **125**

Figure II.33 *:Cycle de température de congélation-décongélation*……..... **125**

Figure II.34 *:BSF immergés dans 5% de HCL*…….. **126**

Figure II.35 *:BSF immergés dans 5% de MgSO4*…….. **127**

Figure II.36 *: Mesure l'expansion de l'RAS*……... **128**

Figure II.37 *:Essai de la résistivité électrique*……... **129**

Figure II.38*: Essai de perméabilité aux ions chlorures*……. **130**

Figure II.39 *:Microscope Electronique à Balayage (MEB)*…….. **131**

Figure II.40 *: Essai de diffraction des rayons X (XRD)*..... **132**

Figure III.1 *: Étalement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG*……... **137**

Figure III.2 *: Étalement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de PC*……... **137**

Figure III.3 *: Étalement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG et PC.* **138**

Figure III.4 *:Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG*……... **139**

Figure III.5 *:Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de PC*……... **140**

Figure III.6 *:Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG et PC*……. **140**

Figure III.7 *:Évolution du temps de prise en fonction de la substitution de PC*…… **142**

Figure III.8 *:Variation de l'étalement des BSF à base de PC et SG*…….. **143**

Figure III.9 *:Variation de temps d'écoulement des BSF à base de PC et SG*……... **145**

Figure III.10 *:corrélation entre l'étalement et le temps d'écoulement des BSF*…… **145**

Figure IV.1 *:Résistance à la compression des différents BSF*……... **150**

LISTE DES FIGURES

***Figure IV.2** : Examen au MEB des différents BSF*…… **151**

***Figure IV.3** :Résistance à la flexion des différents BSF*…… **153**

***Figure IV.4** :Vitesse d'auscultation sonique des différents BSF*…… **155**

***Figure IV.5** :Module d'élasticité des différents BSF*…….. **157**

***Figure IV.6**: Porosité des différents BSF*……... **162**

***Figure IV.7** : Examen au MEB de BSF à base 5PC+50SG*……... **162**

***Figure IV.8** : Examen au MEB de BSF à base 10PC+50SG*……. **160**

***Figure IV.9** : Examen au MEB de BSF à base 15PC+50SG*……. **160**

***Figure IV.10** :Absorption d'eau par immersion pour les différents BSF*……... **162**

***Figure IV.11** :Absorption d'eau par capillarité pour les différents BSF*……... **163**

***Figure IV.12** :Evaluation de la résistivité électrique des différents BSF*……... **165**

***Figure IV.13** :Evaluation de la conductivité thermique des différents BSF*……... **166**

***Figure IV.14** :Résistance à l'abrasion des différents BSF*…… **168**

***Figure IV.15** :RCR des différents BSF après l'exposition au feu*……... **170**

***Figure IV.16** :Perte de masse des différents BSF après l'exposition au feu*…….. **172**

***Figure IV.17** :Examen au MEB de BSF à base 10PC+50SG après l'exposition au feu...* **173**

***Figure IV.18** :Examen au MEB de BSF à base 15PC+50SG après l'exposition au feu*… **174**

***Figure IV.19** :Examen visuel des différents BSF après l'exposition au feu*…….. **175**

***Figure IV.20** :Masse résiduelle des différents BSF après l'exposition au gel-dégel*…… **177**

***Figure IV.21** :RCR des différents BSF après l'exposition au gel-dégel*…… **178**

***Figure IV.22** :Etat visuel des différents éprouvette du BSF avant et après l'exposition au gel-dégel*..... **179**

***Figure IV.23** :Explication schématique de l'effet de gel-dégel sur l'interface entre les granulats et la matrice cimentaire (ITZ)*…… **180**

***Figure IV.24** :Observations par le MEB de BSF témoin après RAS*…….. **181**

***Figure IV.25** : Réaction alcali silice des différents BSF*…… **183**

***Figure IV.26** :Observations par le MEB de BSF à base 5PC+50SG après RAS*..... **184**

***Figure IV.27** :Observations par le MEB de BSF à base 15PC+50SG après RAS*……. **184**

***Figure IV.28** :Pénétration des ions chlorures des différents BSF*…….. **185**

Figure IV.29 *:Perte de masse et perte de résistance des différents BSF après immersion dans une solution de HCL…….* **188**

Figure IV.30 *:Mécanisme de l'attaque par les acides……...* **190**

Figure IV.31*:Etat visuel des différents éprouvette du BSF avant et après immersion dans une solution de HCL……* **191**

Figure IV.32 *:Perte de masse et perte de résistance des différents BSF après immersion dans une solution de MgSO4……...* **193**

Figure IV.33 *:Etat visuel des différents éprouvette du BSF avant et après immersion dans une solution de MgSO4……...* **195**

Figure IV.34 *:Diffractogramme XRD du BSF témoin et des BSF avec 50 % de SG et 5, 10 et 15 % de PC……* **198**

Figure IV.35 *:Diffractogramme ATG/ATD du BSF témoin et des BSF contenant 50 % de SG et 5, 10 et 15 % de PC……...* **200**

Figure IV.36 *:Corrélation entre la résistance à la compression et VAS des déférent BSF……* **201**

Figure IV.37 *:Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression…….....* **202**

Figure IV.38 *:Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité des défèrent BSF……* **203**

Figure IV.39*:Corrélation ente la résistance à la compression et la perméabilité aux ions chlorures des défèrent BSF……..* **204**

Figure IV.40 *:Corrélation entre la porosité et la perméabilité aux ions chlorures des défèrent BSF……* **206**

Figure IV.41 *:Corrélation entre la porosité et l'absorption d'eau des défèrent BSF…….* **207**

Figure IV.42 *:Corrélation entre la porosité et la résistivité électrique des défèrent BSF* **208**

Figure IV.43 *:Corrélation entre la résistivité électrique et la perméabilité aux ions chlorures des défèrent BSF……..* **209**

Figure IV.44 *:Déférent phases du cycle de vie du béton……* **210**

Figure IV.45 *:Processus pris en compte dans l'analyse de l'impact environnemental des différents BSF élaborés dans le cadre de cette étude……..* **212**

Figure IV.46 *:Impact environnemental par volume de consommation de matières premières pour tous les BSF*…… **214**

Figure IV.47 *:Coefficenet de réduction de volume de consommation de matières premières pour défferents BSF*…… **214**

Figure IV.48 *:Emission de CO_2 due à la phase du transport des matieres premiere pour tous les BSF*……. **215**

Figure IV.49 *:Emission de CO_2 due à la phase de production et extraction des matieres premiere pour tous les BSF*……. **215**

Figure IV.50 *: Emission total de CO_2 due à la phase de production de tous les BSF*….. **216**

Figure IV.51 *:Coefficenet de réduction d'émissins de CO_2 pour défferents BSF*…….. **216**

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 *: Relation entre le dosage en ciment et la granulométrie……..* **9**

Tableau I.2 *:Catégories d'impacts environnementaux et leurs unités prises en compte par la méthode CML-IA……* **35**

Tableau I.3 *:Travaux de recherche sur l'incorporation des coquillages dans l'industrie du béton……..* **44**

Tableau I.4 *:Variation de la résistance à la traction des déférent bétons……..* **54**

Tableau I.5*: Consommation des granulats par secteur……..* **67**

Tableau I.6*:Compositions chimiques des granites utilisés dans plusieurs études……..* **75**

Tableau I.7*:Les déférents sous-classes de textures grenues de granite……..* **76**

Tableau I.8*:Variation de la résistance à la compression du béton……* **81**

Tableau II.1 *: Compositions chimiques et propriétés physiques de ciment, PM et PC…..* **105**

Tableau II.2 *: Compositions chimiques et propriétés physiques des granulats utilisés.…* **108**

Tableau II.3 *:Composition des différentes BSF étudiés dans un 1 m^3……..* **113**

Tableau II.4 *: Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure……* **131**

Tableau III.1 *: Résultats d'étalement sur BSFT pour différents % de SP……* **135**

Tableau III.2 *: Principaux effets constaté suite aux essais sur BSF aux états frais……* **146**

Tableau IV.1*:Impact environnemental des mélanges des BSF sur la consommation d'énergie pour une fabrication de 1m^3 de BSF……* **217**

Tableau IV.2 *: Principaux effets observés sur BSF aux propretés physico-mécanique, durabilité et impact environnemental……* **218**

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

ASTM: American society for testing materials;

BSF : Béton de sable fluide ;

BS : Béton de sable ;

BSFT : Béton de sable fluide témoin ;

BSA : Béton de sable autoplacant ;

C-S-H : Silicate de calcium hydraté ;

$CaCO_3$: Calcite ;

CaO : Oxyde de calcium ou chaux vive ;

SiO_2 : Silicium ;

MgO : Magnésium ;

D_{max} : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire ;

AFGC :L'association française de Génie Civil ;

C.P.A : Ciment Portland artificiel ;

E/C : Le rapport Eau / Ciment ;

E/L : Le rapport Eau / Liant ;

DRX : Diffractométrie aux rayons X ;

MEB : Microscope électronique à balayage ;

ATG : Analyse thermogravimétrique ;

ATD : Analyse thermique différentielle ;

VAS : Vitesse d'auscultation sonique ;

RCR :Résistance à la compression résiduelle ;

DG : Déchets de granite ;

SG : Sable de granite ;

SN : Sable naturel ;

PC : Poudre de coquillage ;

PM : Poudre de marbre ;

SSP : Surface spécifique d'une poudre ;

SP : Superplastifiant;

SP/L : Le rapport Superplastifiant/liant ;

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

ZTI : Zone de transition interfaciale ;

HCL : Acide chlorhydrique ;

$MgSO_4$: Sulfate de magnésium ;

RAS :Réaction alcali-silice ;

NaOH : D'hydroxyde de sodium ;

RE :Résistivité électrique ;

NaCl : Chlorure de sodium ;

$CaCl_2$: Chlorures de calcium ;

F (Fe_2O_3): Oxyde ferrique (hématite) ;

H (H_2O): Eau ;

K (K_2O): Oxyde de potassium.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La croissance continue de la demande en matériaux de construction conduit à une pression accrue sur les ressources naturelles, ce qui soulève des préoccupations quant à leur épuisement. Dans ce contexte, adopter une approche de développement durable est devenu impératif. L'utilisation systématique de matériaux alternatifs, y compris les sous-produits industriels et les matériaux recyclés, peut constituer une solution pour contrer la rareté des matériaux de construction conventionnels. Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes, la fumée de silice, les laitiers de hauts fourneaux ont depuis plusieurs décennies démontré un fort potentiel en tant que substituts partiels du ciment Portland. Les recherches menées dans ce domaine indiquent qu'ils peuvent être introduits dans le béton sans compromettre sa qualité, et qu'ils peuvent même améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité dans de nombreux cas.

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde après l'eau. Cependant, sa production nécessite d'importantes quantités de granulats et de ciment, ce qui engendre des problèmes environnementaux majeurs tels que les émissions élevées de CO_2 et la consommation importante d'énergie, ainsi que la consommation des ressources naturelles. Pour faire face à ces défis, il est crucial de promouvoir une économie circulaire dans le secteur de la construction, que ce soit par le biais de la recherche ou de l'innovation. Les avancées technologiques futures contribueront à réduire la pollution en recyclant et en valorisant les déchets industriels et marins dans le béton, que ce soit sous forme de granulats ou d'additifs cimentaires, afin de minimiser leur impact sur l'environnement. C'est pourquoi l'industrie du béton innovant s'engage à réduire la quantité de déchets solides, qui occupent actuellement une place importante dans notre environnement, et à diminuer la consommation de matières premières en remplaçant les matériaux primaires du béton par des matériaux secondaires ou recyclés.

Les déchets industriels, tels que les granites utilisés dans la construction, représentent une source de déchets ayant des répercussions désastreuses sur l'environnement. Ces déchets peuvent poser des problèmes significatifs et avoir un impact considérable sur l'écosystème en raison de leur grande quantité et de leur longue durée de vie. Il est donc impératif de gérer ces déchets de granite de manière à atténuer leurs conséquences néfastes. De nombreux

chercheurs soutiennent que les déchets de granite recyclés peuvent être utilisés comme substituts du sable naturel dans les mortiers et les bétons.

Actuellement, l'utilisation des ajouts cimentaires tels que les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles, le laitier et la fumée de silice a ouvert la voie à un béton plus durable. Ces matériaux non seulement réduisent la dépendance aux ressources naturelles, mais renforcent également l'intégrité structurale et la durabilité du béton. La poudre de coquillage (PC) est un matériau d'origine biosourcé caractérisé par une réaction pouzzolanique, obtenue par la calcination de déchets de coquillages broyés à des températures variant entre 500 °C et 1000 °C. De nombreux chercheurs ont observé que l'ajout de PC au mélange améliore sa maniabilité, ce qui permet généralement de réduire le rapport eau/ciment ou l'utilisation de superplastifiants (SP) pour atteindre l'ouvrabilité souhaitée. Cette réduction représente un avantage positif en termes de coût pour le béton de sable fluide (BSF).

L'évènement du BSF présente une nouvelle étape dans l'évolution de la technologie du béton, offrant plusieurs avantages techniques dans les domaines de la construction civile et industrielle. Sa capacité à s'écouler et à remplir le coffrage sous son propre poids, sans nécessiter de vibration ou d'énergie externe, même dans des espaces restreints avec un renforcement encombré, est particulièrement remarquable. Le résultat final est un béton de haute qualité, sans ressuage et sans ségrégation. Cependant, les inconvénients associés à ce type de béton sont principalement liés à son coût, car de grandes quantités de ciment Portland et d'adjuvants chimiques sont nécessaires pour assurer une meilleure maniabilité.

Dans ce contexte, cette thèse s'articule autour d'une approche écologique et économique. L'objectif principal de cette recherche est de développer un béton de sable fluide écologique à base de déchets industriels et de déchets biosourcés, en utilisant notamment ces déchets comme granulats et ciment. Ce projet vise à réduire l'extraction de granulats en termes de la consommation de ressources naturelles, les émissions de CO_2 et les coûts de construction. En outre, cette étude s'attache à évaluer les propriétés rhéologiques, physiques, mécaniques et la durabilité à moyen et long terme d'un béton de sable fluide intégrant des déchets de granite comme granulats fins et des déchets de coquillage comme ajout cimentaire.

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

Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique sur les propriétés du BSF à l'état frais, ainsi qu'à une exploration des applications de ce type de béton dans le monde et en Algérie. Enfin, nous présentons les principales compositions et méthodes de formulation des BSF. Le chapitre est finalisé par une revue bibliographique sur les déchets de coquillage et de granite respectivement, ainsi que leur utilisation en tant que granulats de granite (SG) et poudre de coquillage (PC) dans l'industrie du béton. Nous examinons les propriétés du béton recyclé à base de granite et leur impact sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du béton. Ensuite, nous analysons l'effet de la poudre de coquillage sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.

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

Le troisième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats des différents essais réalisés à l'état frais. Ce chapitre est lié avec le deuxième chapitre pour la validation de la méthode de formulation des différentes gammes de BSF à base de PC et SG, et met aussi en avant des relations entre les propriétés à l'état frais évaluées par des essais expérimentaux mesurées par des essais au étalement en mini-cône et le temps d'écoulement en V-funnel afin de comprendre mieux le comportement rhéologique des BSF réalisés avec différents matériaux.

Le dernier chapitre traite des propriétés des BSF à l'état durci. Dans une première partie, il est mis en évidence l'effet de la PC et du SG sur les propriétés physico-mécaniques. La deuxième partie est consacrée aux tests de durabilité, deux paramètres de transfert dans les milieux poreux, ainsi qu'au comportement de BSF après l'exposition à différentes conditions agressives. Le manuscrit s'achève par la fin d'une analyse environnementale et écologique des BSF étudiés.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale et des perspectives pour le futur, en rappelant les principaux résultats obtenus sur la faisabilité de BSF en substituant le ciment par la poudre de coquillage et le sable naturel par les granulats de granite.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

Les déchets et 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 des déchets lorsque les caractéristiques de ces derniers le permettent. L'industrie de la construction a connu un grand développement ces dernières années, alors que la recherche continue pour obtenir de nouveaux matériaux de construction renouvelables et économiques. Surtout dans les zones où il y a une pénurie de certains matériaux. Par exemple, le sud algérien avec son vaste désert se caractérise par un manque important de matériaux de construction de base, tels que le sable et le gravier, ce qui nécessite l'utilisation de nouveaux matériaux alternatifs pour compenser cette pénurie.

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 (BAP), les bétons de sable et les bétons de sable fluide (BS et BSF), 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.

L'avènement du béton de sable fluide (BSF) marque une nouvelle étape dans l'histoire des matériaux en béton de sable (BS), d'où l'idée des chercheurs comme Guendouz et Boukhelkhal **[1]**. Le BSF se caractérise généralement par des proportions de mélange qui incorporent différents additifs chimiques et minéraux dans des proportions définies nécessaires pour respecter les spécifications du fluide (autoplaçant) et de sa stabilité visant à la ségrégation. La recherche pour développer le BSF dans cette mesure n'a pas empêché, mais 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 complexes)

bien qu'un autre aspect bénéfique pour les personnes, ce qui contribue à la réduction des risques d'accidents et le coût de main-d'œuvre.

La spécificité du BSF 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.

Dans ce chapitre, on a présenté une synthèse bibliographique dans laquelle il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail, à savoir l'application des BSF dans le monde et en Algérie. Ce chapitre servira par la suite utilisation de la poudre de coquillage (PC) et du sable de granite recyclé (SG) dans l'industrie de béton.

I.2.GÉNÉRALITÉ SUR L'INDUSTRIE DU BETON DE SABLE

I.2.1. Le béton de sable

Le béton de sable, connu également sous le nom de «béton fin» à partir des années 1850-1875, représente une alternative plus ancienne au béton traditionnel. Sa composition répond aux normes définies par la norme NF P 18-500 (1995), modifiée en octobre 1987 par l'AFNOR **[2]**. Ce type de béton se distingue principalement par l'utilisation de granulats spécifiques. En effet, sa composition principale repose sur le sable (qu'il soit issu de dunes, de rivières ou concassé), excluant l'usage de gravier. Cependant, dans les rares cas où du gravier est utilisé, le rapport massique (gravillon/sable) demeure inférieur à 0,7, caractérisant alors un béton de sable chargé **[3]**.

« Une question pourrait se poser : quelle est la différence entre le béton de sable et le mortier ? »

Le béton de sable, comme son nom l'indique, est principalement constitué de sable en tant que gros granulat (Dmax ≤ 5 mm). Sa composition requiert généralement une quantité de ciment comprise entre 250 et 400 Kg/m^3, ce qui correspond au dosage habituel des bétons conventionnels. Pour atteindre une compacité optimale, il est souvent nécessaire d'ajouter des fines (fillers) et des plastifiants. En revanche, le mortier associé à ce type de béton nécessite un dosage plus élevé en ciment, généralement compris entre 400 et 600 kg/m^3**[4]**.

I.2.2. Histoire sur le béton de sable

Le béton de sable, un matériau ancien dont le développement a débuté à la fin du 19e siècle, trouve ses racines dans le béton aggloméré initié par François Coignet en 1853. Cette variante de béton se caractérise par l'absence de cailloux, composée plutôt d'un mélange de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et broyée, de chaux hydraulique naturelle et d'une faible quantité d'eau . Les premières utilisations du béton de sable ont été observées en 1869, notamment dans la construction du phare de Port-Saïd, haut de 52 mètres, réalisé à partir d'un mélange de sable local et de chaux importée de France (voir la figure I.1), ainsi que dans le pont de New-York en 1872 **[5]**.

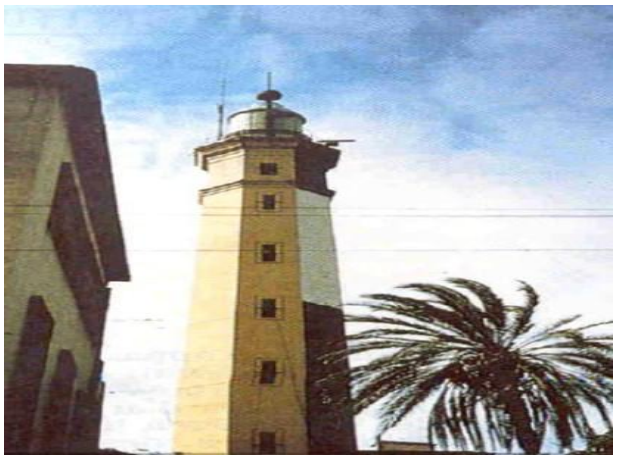


Figure I.1*: Phare de port Saïd réalisé en béton du sable Coignet (Egypte)* **[6]**.

Entre 1869 et 1872, Coignet a entrepris une tentative de correction granulaire pour la construction de certaines sections de l'aqueduc de captation des eaux de la rivière la vanne, long de 40 km, qui relie Bluefontain à Orléans. Cette tentative impliquait l'utilisation d'un sable fin traditionnel combiné à un autre type de sable non utilisé à l'époque, ainsi qu'un liant composé de chaux et de ciment **[6]**. Cette méthode a également été adoptée par l'ancienne Union Soviétique, qui l'a étendue vers l'Europe occidentale, comme en témoignent certains projets réalisés au cours de cette période **[7]**:

- ✓ Le port de Kaliningrad en Prusse-Orientale.
- ✓ Le pont Chernavskif coulé sur place à Varonej (500 km environ de Moscou).

Pendant les années 70, l'intérêt pour cette technique s'est accru en France, en particulier dans la région Sud-Ouest. Ceci s'explique par la pénurie de granulats alluvionnaires et la disponibilité de vastes gisements de sable. Suite à cela, après plusieurs initiatives et travaux de recherche menés par l'Association pour la production et le développement du béton de sable, visant à formuler ce type de béton aux caractéristiques similaires à celles des bétons classiques, le projet SABLOCRETE a été lancé en 1988 **[6, 8]**.

En Algérie, l'utilisation du béton de sable demeure encore rare voire inexistante, en dépit de l'abondance de sable dans le sud du pays, représentant 60 % de sa superficie. Bien que des recherches aient été menées dans les universités et les laboratoires, ce type de béton demeure largement méconnu et n'a pas encore trouvé d'application concrète sur le terrain **[9]**.

I.2.3. Les constituants d'un béton de sable

Le béton de sable, en plus de sa composante principale qui est le sable, est composé essentiellement de ciment, d'eau, de filler (qu'il soit naturel ou industriel) et d'adjuvants tels que les plastifiants et les superplastifiants. Il peut éventuellement ajouté des fibres ou des ajoutes cimentaires tels que la fumée de silice, la poudre de verre, le laité de haut fourneau et la pouzzolane pour répondre aux exigences de certaines applications **[10]**.

a) Le sable

Le terme «sable» désigne ici tous les granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF XP P 18-545 (2004). Aucune restriction n'est imposée quant à l'origine du sable utilisé. Il peut être soit un sable fin homométrique, tel que le sable de dune, soit un sable de carrière provenant du concassage d'une roche massive ou détritique, soit d'origine alluvionnaire ou issu d'une ballastière. Aucun critère granulométrique spécifique n'est nécessaire pour la réalisation d'un béton de sable. La seule exigence concernant l'utilisation des sables est leur propreté, selon les directives de SABLOCRETE (1994) **[3]**.

b) Les additions minérales

Les bétons de sable sont généralement définis comme des bétons fins. Étant donné que le diamètre maximal des granulats (D_{max}) est inférieur ou égal à 5 mm dans le cas du béton de sable fluide, cela nécessite un dosage en ciment très élevé, dépassant souvent les 400 kg/m^3. Pour obtenir une compacité importante du mélange, il est nécessaire de combler les vides

entre les particules du sable, qui sont plus petits que ceux des granulats, en ajoutant des fillers ou fines.

Le terme «filler» vient de l'anglais «to fill», signifiant remplir, et fait référence à des matériaux dont le plus gros grain ne dépasse pas 80 um, généralement obtenus par broyage ou pulvérisation de certaines roches. Le remplissage des vides par des fillers augmente la compacité du mélange, permettant ainsi de garantir la rigidité en complétant le dosage en ciment, habituellement utilisé pour les bétons ordinaires **[4]**. Cette relation entre le besoin en fines et le dosage en ciment est exprimée par la règle bien connue : C = 550 / 5D ou C = 700 / 5D (selon l'utilisation du béton), où C représente le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) des granulats utilisés, comme indiqué dans le tableau I.1.

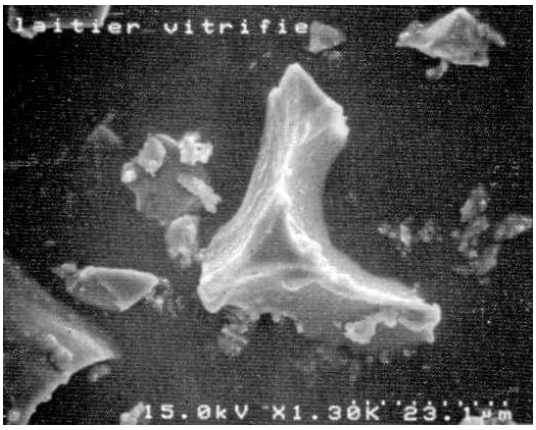
***Tableau I.1** : Relation entre le dosage en ciment et la granulométrie* **[3]**.

Granularité	$^{5}\sqrt{D}$	**550/** $^{5}\sqrt{D}$	**700/** $^{5}\sqrt{D}$	
0/25	1.904	290	370	
0/20	1.821	300	385	
0/16	1.741	315	400	**Béton**
0/8	1.516	360	460	
0/6.3	1.445	380	480	
0/4	1.320	418	530	
0/2	1.149	480	610	**Mortier**
0/1	1.000	550	700	

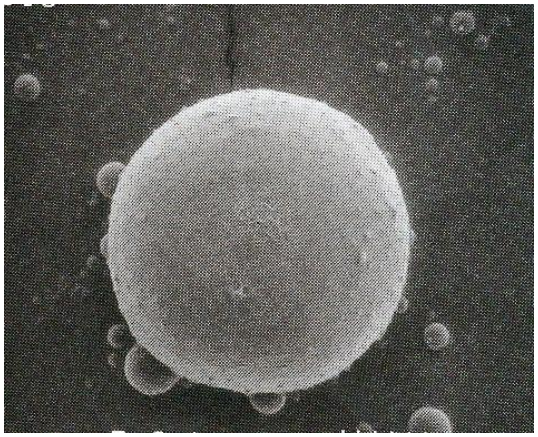
Il existe deux types de fines : les fines actives, telles que la fumée de silice, le laitier moulu, la pouzzolane broyée, la cendre volante, les déchets de verre broyé, etc., et les fines inertes, telles que les fines de calcaire ou de marbre issues du broyage des roches massives. Parmi les deux types de fillers que nous utiliserons, nous avons les fillers calcaires (fines inertes) et la poudre de verre provenant des déchets de verre broyé, ainsi que la fumée de silice (fines actives).

L'impact de la forme des grains et de la nature géologique des fillers sur la manipulation du mélange et sur la compacité du béton durci. Les fillers présentant des grains sphériques, comme le filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux ayant des grains anguleux, tels que le filler siliceux. Cette caractéristique des fillers sphériques contribue à une meilleure compacité du mélange durci, comme illustré dans les figures I.2 et I.3

respectivement. En ce qui concerne les fines, elles peuvent être catégorisées en fines actives, comme les laitiers moulus et les cendres volantes, et en fines passives, issues du broyage de roches massives, telles que les fillers calcaires et siliceux **[11]**.



Figures I.2** : Fines anguleuses[11]**.



Figures I.3** : Fines sphériques[11]**.

c) Filler de calcaire

Le filler de calcaire est une roche minérale finement broyée afin de répondre aux critères de conformité de la norme française NF P18-508 (1995) sur les additions minérales calcaires. L'ajout de filler calcaire permet de compléter la courbe granulométrique d'un ciment qui serait déficient en granulométrie par rapport au sable, et il peut également influencer la résistance à l'hydratation, en particulier aux premiers stades de durcissement. Il peut agir dans les pores capillaires et influencer les propriétés rhéologiques du béton. Cet effet, connu sous le nom d'effet filler comme illustré sur la figure I.4, se traduit par une compacité accrue du

squelette granulaire, ce qui aura des répercussions sur les propriétés du béton à la fois à l'état frais et à l'état durci**[12]**.

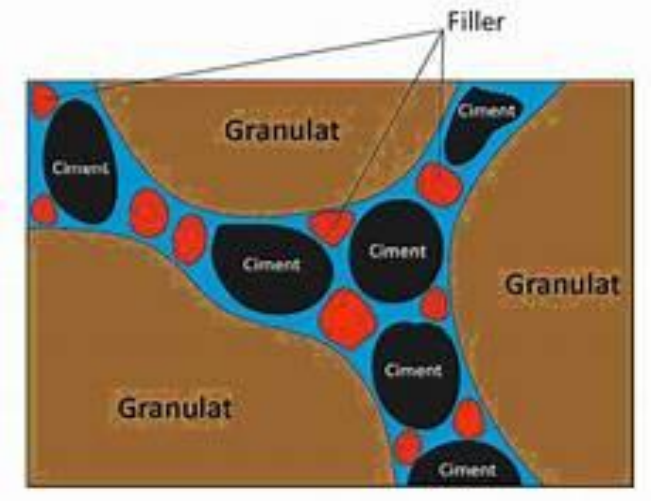


Figure I.4 *:Effet de filler* **[4]**.

d) La fumée de silice

Les fumées de silice, également connues sous le nom de microsilice, sont des résidus évacués de la chambre de combustion d'un four utilisé pour produire du silicium et des alliages contenant du silicium. Elles se présentent sous forme de microsphères de silice amorphe avec un diamètre moyen d'environ 0,1 µm (figure I.5) et une surface spécifique pouvant varier entre 20 et 25 m^2/g. En raison de leur finesse et de leur forme vitreuse, les fumées de silice sont très réactives. Leur incorporation dans la composition des bétons à des concentrations comprises entre 7 et 15 % par rapport à la masse de ciment permet d'atteindre des résistances mécaniques élevées et d'obtenir des bétons plus denses, plus imperméables et donc plus durables. Cependant, en raison du risque élevé de retrait plastique pour ce type de béton, une bonne cure du béton est essentielle **[13]**.

L'utilisation de la fumée de silice dans les matériaux de réparation améliore l'adhérence entre le rechargement et le support à réparer. Des études ont montré que les bétons de réparation contenant de la fumée de silice présentent des résistances d'adhérence similaires à celles obtenues avec des adhésifs à base de résine époxy **[14]**.

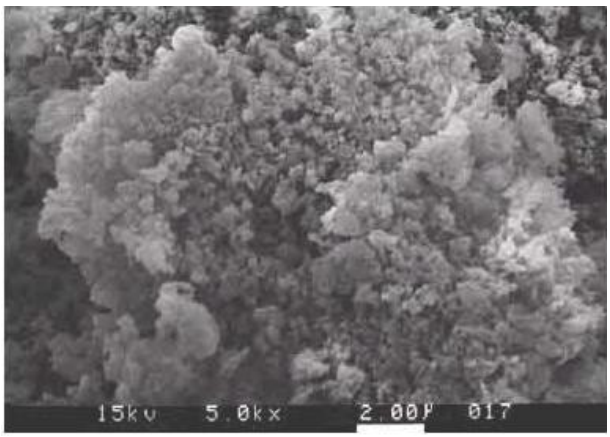


Figure I.5** :Microstructure du fumée de silice (forme sphérique)[15]**.

e) Le laitier

Ce sont des résidus minéraux obtenues après le refroidissement rapide des scories issues de la fusion des minéraux de fer dans un haut fourneau. Ils se composent principalement d'oxydes de calcium (CaO), de silicium (SiO_2) et de magnésium (MgO). Les ciments à base de laitier présentent une meilleure résistance chimique dans des environnements agressifs, tels que les eaux sulfatées ou les milieux marins, et contribuent à la durabilité du béton. On distingue généralement deux types de laitiers **[14]**:

- Le laitier granulé ;
- Le laitier solidifié à l'air libre.

f) Les ciments

En général, les ciments utilisés dans la fabrication des bétons de sable doivent se conformer à la norme NF P15-301 (1994). Pour les bétons ordinaires, le choix du ciment est influencé par ses propriétés d'hydratation, sa classe de résistance et les caractéristiques mécaniques recherchées. De plus, il est également déterminé par l'agressivité du milieu environnant et l'usage spécifique du béton. Dans de nombreux cas, les ciments sans ajout (CEM I) sont privilégiés par rapport aux ciments avec ajout (CEM II à CEM V) afin de tirer parti de manière plus efficace de l'activité pouzzolanique des fines d'addition **[4]**.

g) L’eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel dans la préparation des bétons et des mortiers à base de liants hydrauliques. Le choix de l'eau revêt une importance capitale, car elle joue plusieurs rôles fondamentaux. Tout d'abord, elle est nécessaire à l'hydratation du liant et au mouillage des granulats. De plus, elle contribue à conférer la plasticité nécessaire au béton pour sa mise en œuvre. De manière similaire aux bétons conventionnels, l'eau de gâchage utilisée dans la préparation des bétons de sable doit être conforme à la norme NF EN 1008 (2003)**[16]**.

h) Les adjuvants

La particularité du béton de sable réside dans la préférence accordée à l'utilisation de plastifiants ou de superplastifiants. Ces additifs améliorent généralement la maniabilité du mélange, souvent tout en renforçant la résistance grâce à une réduction de la teneur en eau et à la défloculation des éléments fins. Les superplastifiants, souvent utilisés dans la composition des bétons de sable et également appelés réducteurs d'eau, sont des polymères solubles dans l'eau qui permettent une augmentation significative de la maniabilité des bétons. Selon la norme NF EN 934-2 (2002), ces superplastifiants sont des substances ajoutées au béton pendant le processus de malaxage, en quantités inférieures à 5 % de la masse totale de ciment, afin de modifier ses propriétés à l'état frais et à l'état durci**[17]**.

I.2.4. Propriétés générales du béton de sable

Bien que l'attention se concentre davantage sur les propriétés du béton une fois qu'il a durci, il est crucial de noter que si le processus de mise en place du béton n'est pas correctement exécuté, les caractéristiques souhaitées ne seront pas atteintes. Les caractéristiques requises pour le béton frais varient selon chaque application et déterminent si le béton possède des propriétés satisfaisantes à l'état frais, telles que les exigences en matière de finition, de mise en œuvre, de pompage et de résistance à la ségrégation **[18]**.

De nos jours, avec le développement croissant de nouveaux types de béton, il devient de plus en plus essentiel de mieux caractériser leur comportement et leur capacité à s'écouler. De nombreux ajouts cimentaires et l'utilisation d'adjuvants organiques ont considérablement modifié les propriétés du béton. Par conséquent, l'importance de la maniabilité du béton et de sa mesure s'est également accrue de manière significative **[19]**.

Les performances du béton durci sont fortement influencées par ses propriétés à l'état frais, notamment l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. La maniabilité est conditionnée non seulement par le rapport eau/ciment, mais également par le module de finesse du sable, et elle est surtout affectée par le type et la quantité de fines présentes dans les ajouts. La caractérisation d'un tel béton (BS) est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique des essais spécifiques. Des recommandations de caractérisation ont été émises par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) **[20]** ainsi que par les guides européens (EFNARC) **[21]**. Ces recommandations sont devenues des références in situ pour valider une formulation de BS. Elles divisent les BS à l'état frais en trois (3) propriétés essentielles et proposent des essais simples et empiriques à réaliser pour chacune d'elles.

- La maniabilité ;
- La résistance à la ségrégation ;
- La résistance à la compression .

I.2.4.1. Maniabilité

Bien que les bétons de sable (BS) nécessitent une quantité d'eau de gâchage plus importante que les bétons ordinaires, ce qui entraîne des rapports E/C (Eau/Ciment) supérieurs à 0,5, généralement entre 0,6 et 0,7, en raison de la grande surface spécifique du mélange, il convient de considérer le rapport E/C+A (A=addition en fines activées), qui conduit à des rapports similaires à ceux des bétons ordinaires. Les BS sont privilégiés dans des applications nécessitant une bonne ouvrabilité, voire permettant des niveaux d'ouvrabilité inaccessibles avec des bétons traditionnels. Toutefois, cette simplification reste schématique, car les avancées dans les techniques d'adjuvantation, de composition, de traitement et de fabrication des bétons permettent aujourd'hui de produire des bétons spéciaux à haute performance mécanique tout en conservant de bonnes propriétés d'ouvrabilité. Il est également possible de fabriquer des BS très maniables tout en offrant d'excellentes performances mécaniques **[22]**.

Les dosages en ciment pour les BS varient généralement entre 250 et 450 kg/m^3, et la compacité optimale est obtenue en ajoutant des fines et des superplastifiants. La résistance à la compression à 28 jours se situe généralement entre 12 et 60 MPa, en fonction de la composition **[23]**. Le dosage en fines et la maniabilité dépendent également de la nature et de

la granulométrie du sable. En effet, la granulométrie du sable influe sur le besoin en eau ; plus le sable contient d'éléments grossiers, meilleure est la maniabilité. Les graphiques présentés sur la figure I.6 illustrent l'effet de différent pourcentages en fines calcaires dans un sable alluvionnaire et un sable de dune. On observe qu'ajouter des fines jusqu'à 200 kg/m^3 entraîne une diminution de la maniabilité pour le sable de dune, ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire **[22]**.

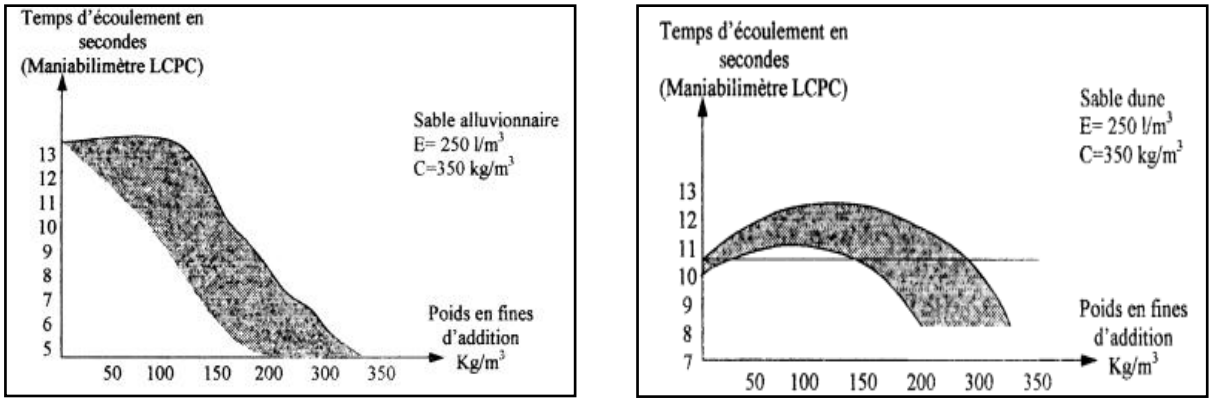


Figure I.6 *:Influence de la nature du sable sur la maniabilité* **[22]**.

I.2.4.2. Granulométrie

La granulométrie du sable influencée sur le besoin en eau lors du mélange ; une plus grande présence d'éléments grossiers dans le sable améliore la maniabilité, comme le montre la figure I.7 qui illustre la relation entre le module de finesse et la maniabilité. Cette figure montre clairement que la maniabilité diminue avec l'augmentation du module de finesse. Cependant, pour un rapport eau/ciment fixe, la maniabilité dépend de la nature des fines ajoutées. La faible variation granulaire du béton de sable, ainsi que sa grande homogénéité et sa bonne maniabilité, lui confèrent un comportement plus favorable que celui des bétons traditionnels en ce qui concerne la ségrégation **[24]**.

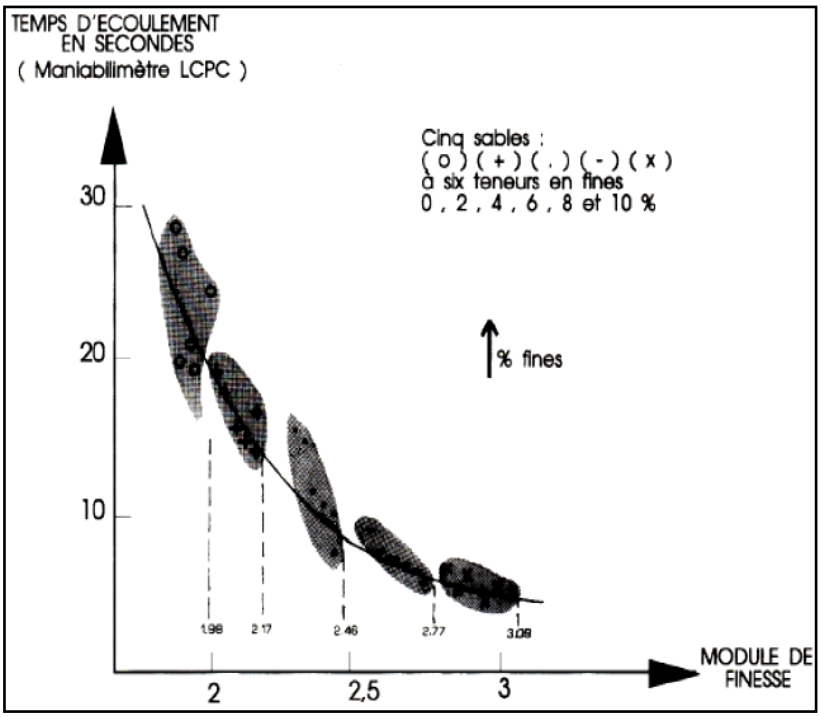


***Figure I.7** :Influence de la granulométrie du sable sur la maniabilité d'un BS* **[24]**.

I.2.4.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression est une caractéristique fondamentale du béton, et diverses études ont été utilisées pour améliorer cette propriété dans le cas du béton de sable fluide. Ces recherches ont révélé des niveaux de résistance appréciables pour ce matériau, comparables à ceux du béton conventionnel. Pour des dosages en ciment compris entre 250 et 450 kg/m^3, la résistance à la compression atteinte à 28 jours varie entre 12 et 45 MPa en fonction de la composition, des adjuvants et du mode de mise en œuvre. Plusieurs paramètres, tels que la granulométrie et la finesse des ajouts, peuvent influencer la résistance à la compression pour une teneur en ciment fixe**[24]**.

a) La granulométrie du sable (Dmax)

Pour un rapport eau/ciment constant, la résistance n'est pas significativement influencée par le diamètre maximal des grains de sable (D_{max}), comme illustré dans la figure I.8. Cependant, la maniabilité varie considérablement selon le type de sable. Il est également observé qu'un béton de sable reste très maniable avec un D_{max} de 20 mm, tandis que le contraire est vrai pour un D_{max} de 1,6 mm, nécessitant une quantité d'eau supplémentaire. Ce

même phénomène est observé avec un D_{max} de 5 mm (une taille typique pour les sables courants), où une demande d'eau supplémentaire est constatée. Ainsi, une diminution du D_{max} entraîne une augmentation de la consommation d'eau pour maintenir la même maniabilité, ce qui diminue implicitement la résistance. Cette diminution peut être atténuée en utilisant un réducteur d'eau (Superplastifiant). L'impact de la granulométrie sur la résistance est plus évident avec des dosages en ciment constants **[24]**.

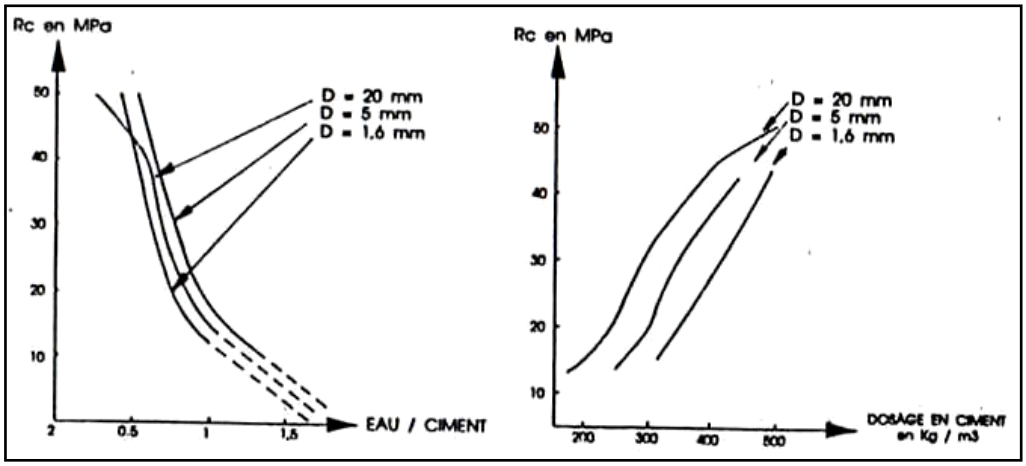


Figure I.8 *:Influence de la granularité sur la résistance à la compression* **[24]**.

De plus, Béderina **[2]** a mené une étude sur trois types de béton de sable présentant différentes granulométries. Le premier béton (DS) utilise du sable de dune avec un D_{max} de 0,630 mm et une proportion d'éléments ailerons inférieure à 0,08 mm et 5 mm. Le deuxième béton (RS) est constitué avec du sable de rivière ayant un diamètre maximal de 5 mm. Le troisième béton (RDS) est un mélange de deux types de sable (dune et rivière). Un rapport de 1,7 est présenté (sable de rivière/sable de dune), où les éléments du sable de dune sont ≤ 0,4 et les éléments du sable de rivière sont supérieurs à 0,4. L'analyse des résultats expérimentaux révèle une meilleure résistance à la compression avec le béton de sable. Par conséquent, une compacité plus importante est enregistrée avec l'introduction du filler calcaire, comme indiqué sur la figure I.9.

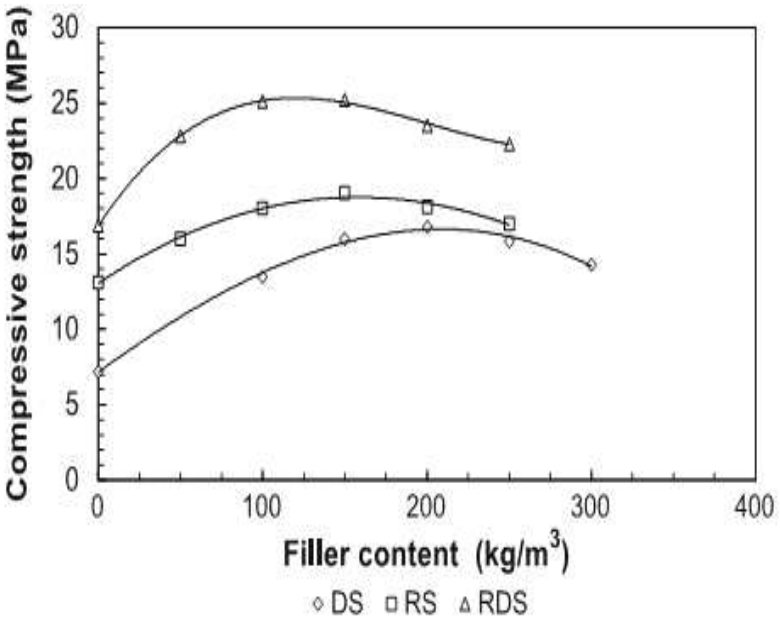


Figure I.9 *:Influence de la granularité en fonction d'ajout du filler calcaire sur la résistance à la compression* **[2]**.

Selon l'étude comparative menée par Belhaj et al. **[25]**, il a été démontré que la forme et la nature du sable exercent une influence significative sur les propriétés mécaniques du béton de sable. Il a observé que le béton fabriqué avec du sable de calcaire concassé, caractérisé par une forme angulaire, présente une meilleure résistance à la propagation des fissures par rapport au béton fabriqué avec des sables dunaire ou alluvionnaire, qui ont une forme plus arrondie. De plus, les bétons utilisant du sable concassé de nature calcaire ont montré une augmentation de la résistance à la compression et à la propagation des fissures de 35 % et 47,26 % respectivement par rapport aux bétons utilisant du sable alluvionnaire de nature siliceuse (figure I.10).

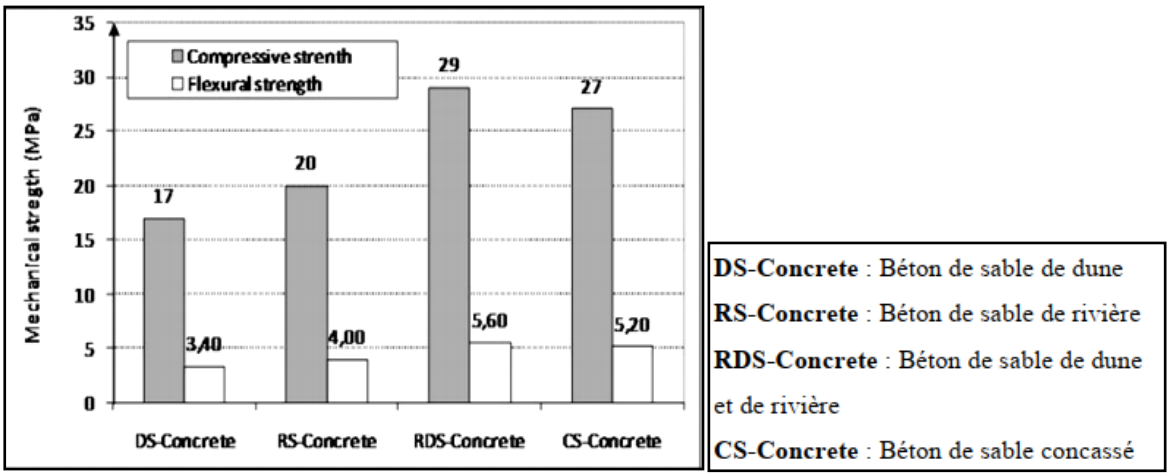


Figure I.10 *:Variation des résistances mécanique en fonction du type de sable* **[25]**.

b) La finesse de l'addition

Il est communément admis que l'addition de fines particules, avec une bonne défloculation, améliore l'efficacité en termes de gain de compacité. Cette constatation reste valide indépendamment de la granulométrie du sable, comme illustré dans la figure I.11. En augmentant le dosage, la compacité augmente, ce qui entraîne une augmentation de la résistance. En augmentant la finesse ou le dosage des fines, la compacité augmente encore davantage, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la compression **[26]**.

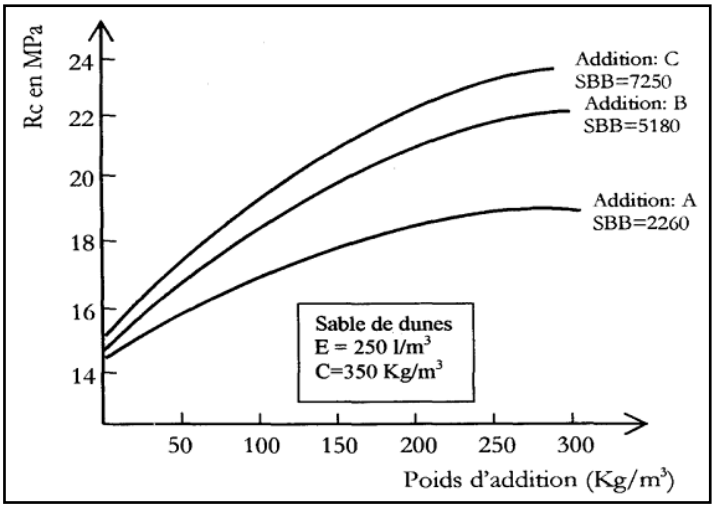


Figure I.11 *:Effets du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression du béton de sable* **[26]**.

c) La nature de l'addition

La figure I.12 met en évidence une différence significative dans les performances selon la nature du filler. Bien que l'addition de fines améliore systématiquement la résistance, les bénéfices varient considérablement. Cette disparité est encore plus marquée lorsque la maniabilité est maintenue constante. Les fillers les plus efficaces sont ceux qui sont hydrauliquement actifs et qui entraînent également une réduction de la teneur en eau **[26]**.

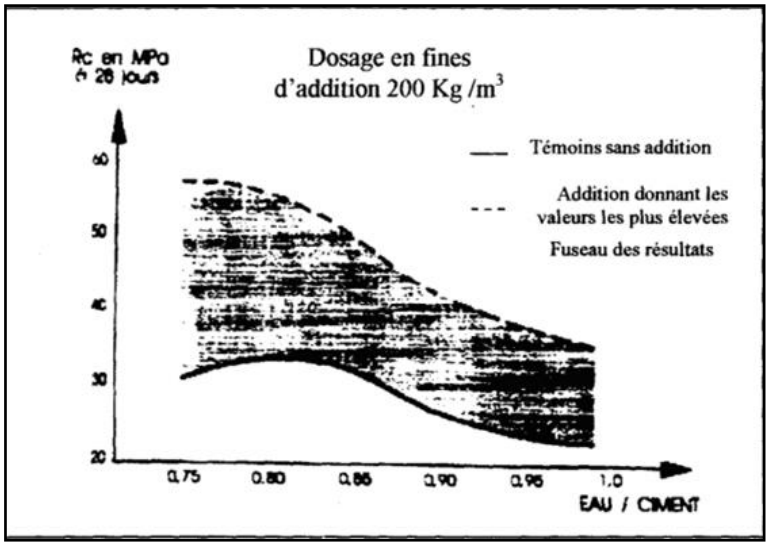


Figure I.12 *:Influence de la nature de l'addition sur la résistance à la compressions du béton de sable* **[26]**.

I.2.5. Propriétés spécifiques

a) La résistance à la traction

Effectivement, le béton de sable est réputé pour sa très faible résistance à la flexion ou à la traction, tout comme les bétons ordinaires. Habituellement, ce paramètre n'est pas pris en compte dans le calcul du béton, mais il est intéressant de le déterminer pour des cas spécifiques, tels que la réparation des structures.

D'autre part, El Euch Khay **[27]** à observé, pour deux classes de ciment, une augmentation linéaire de la résistance à la traction par fendage des bétons de sable compacté en fonction du dosage en ciment, comme le montre la figure I.13. Des valeurs de résistance en fendage supérieures à 2,5 MPa ont été constatées pour trois compositions différentes à base de sable concassé, ce qui représente environ 11 % de la résistance en compression. Néanmoins,

en ce qui concerne la flexion, les résistances ont dépassé 3 MPa, atteignant même 5,3 MPa, ce qui représente 15 % de la résistance en compression **[27]**.

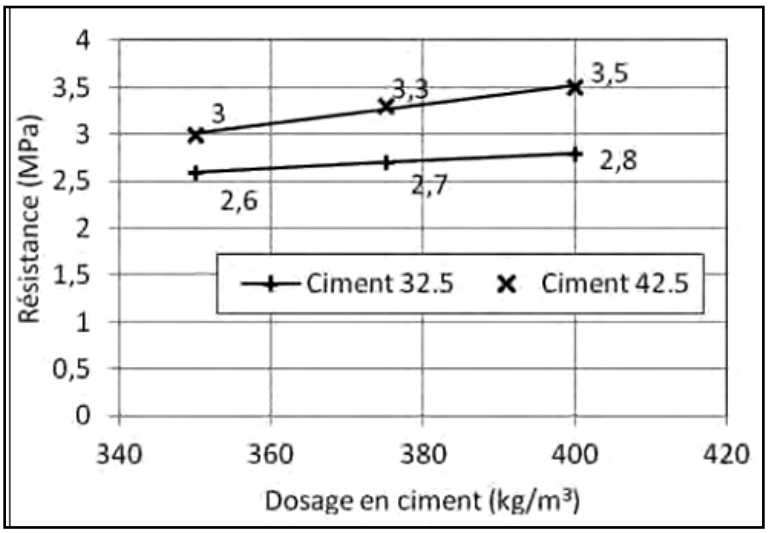
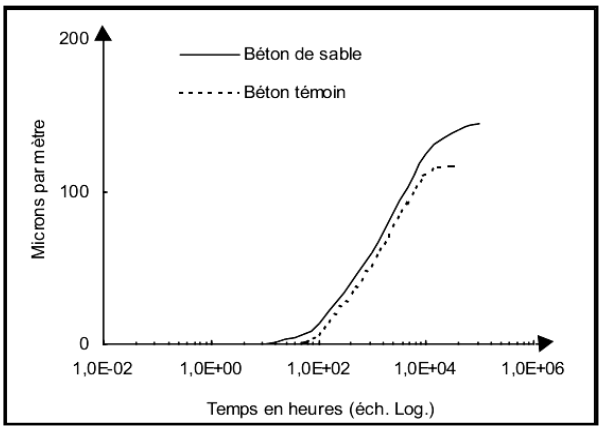


Figure I.13 *:Variation de la résistances à la traction par fendage du béton de sable* **[27]**.

b) Le retrait

Dans le cadre du projet national français de recherche et développement SABLOCRETE (1994) **[26]**, des études comparatives entre bétons remplis de sable et conventionnels ont été menées. Ces expériences ont montré que, conservés en milieu étanche, les valeurs de retrait par auto-dessiccation du béton de sable sont similaires à celles du béton ordinaire (voir la figure I.14). Avec une différence d' environ 10 % par rapport au béton conventionnel , le retrait par auto-dessiccation présente une cinétique proche de celle de ce dernier (Benaissa, 2015) **[28]**. Cependant, l'élimination totale du sable du béton peut atteindre des valeurs jusqu'au double de celles du béton ordinaire si la conservation est effectuée dans un environnement sec (voir la figure I.15).



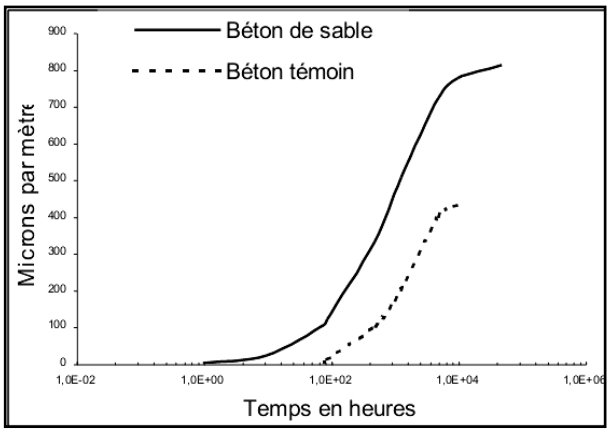


Figure I.14 *:Retrait d'auto-dessiccation* **[26]**. ***Figure I.15*** *: Retrait total* **[26]**.

c) Microstructure du béton de sable

L'examen au microscope électronique à balayage (MEB) sur des échantillons du béton de sable permet de décrire le matériau comme étant dépourvu de fissures significatives, avec une bonne homogénéité d'ensemble et une adhérence satisfaisante entre la pâte de ciment et les particules du sable. Des essais réalisés par Bederina et al. **[29]**, basés sur l'observation au MEB sur trois types de béton de sable, ont montré une pâte de ciment durcie plus ou moins compacte et homogène (voir la figure I.16). On remarque de nombreux hydrates sous forme d'aiguilles et de cristaux en raison de la taille très réduite des pores, ainsi que peu de microfissures courtes et non connectées**[11]**.

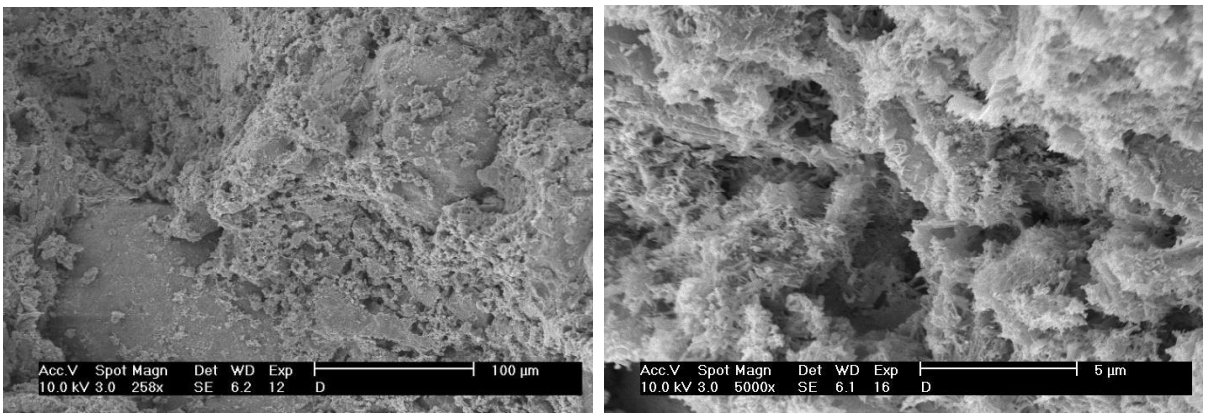


Figure I.16 *: Aspect sur la microstructure du béton de sable* **[29]**.

I.2.6. Formulation de béton de sable

En cas général, les différentes méthodes de formulation permettent d' observer deux propriétés fondamentales du béton de sable fluide : l'ouvrabilité et la résistance à la compression. Les plus récents bétons comprennent les bétons à base de sable, dont la composition est avant tout empirique. Des approches ont été examinées, dans lesquelles l' acceptation de l'ouvrabilité comme critère de formulation s'est révélée très complexe.

Il est largement reconnu que les bétons de sable sont fabriqués à partir de sables ayant une surface spécifique importante. Cela entraîne un besoin supplémentaire en eau et en ciment, ce qui a un impact négatif sur le coût, la résistance à la compression et le retrait du béton. Par conséquent, pour les bétons de sable fluide, il est judicieux de remplacer une partie du ciment par des fillers et de limiter le dosage en eau en ajoutant des adjuvants (superplastifiant).

Dans le cadre du projet français ***SABLOCRETE***, deux méthodes de formulation ont été développées : une théorique et l'autre expérimentale. La synthèse des deux méthodes est comme suit :

- ***La méthode théorique :*** Cette méthode repose sur la formule de Caquot pour déterminer la compacité du squelette granulaire. Cette compacité correspond au complément à l'unité de la porosité (figure I.17).

- ***La méthode expérimentale à ouvrabilité (étalement) et résistance fixées :*** Cette méthode, dérivée de la méthode de Baron-LESAGE, est itérative et repose sur la réalisation de mélanges légers, caractérisés par la fixation de l'étalement au miné cône et de la résistance à la compression.

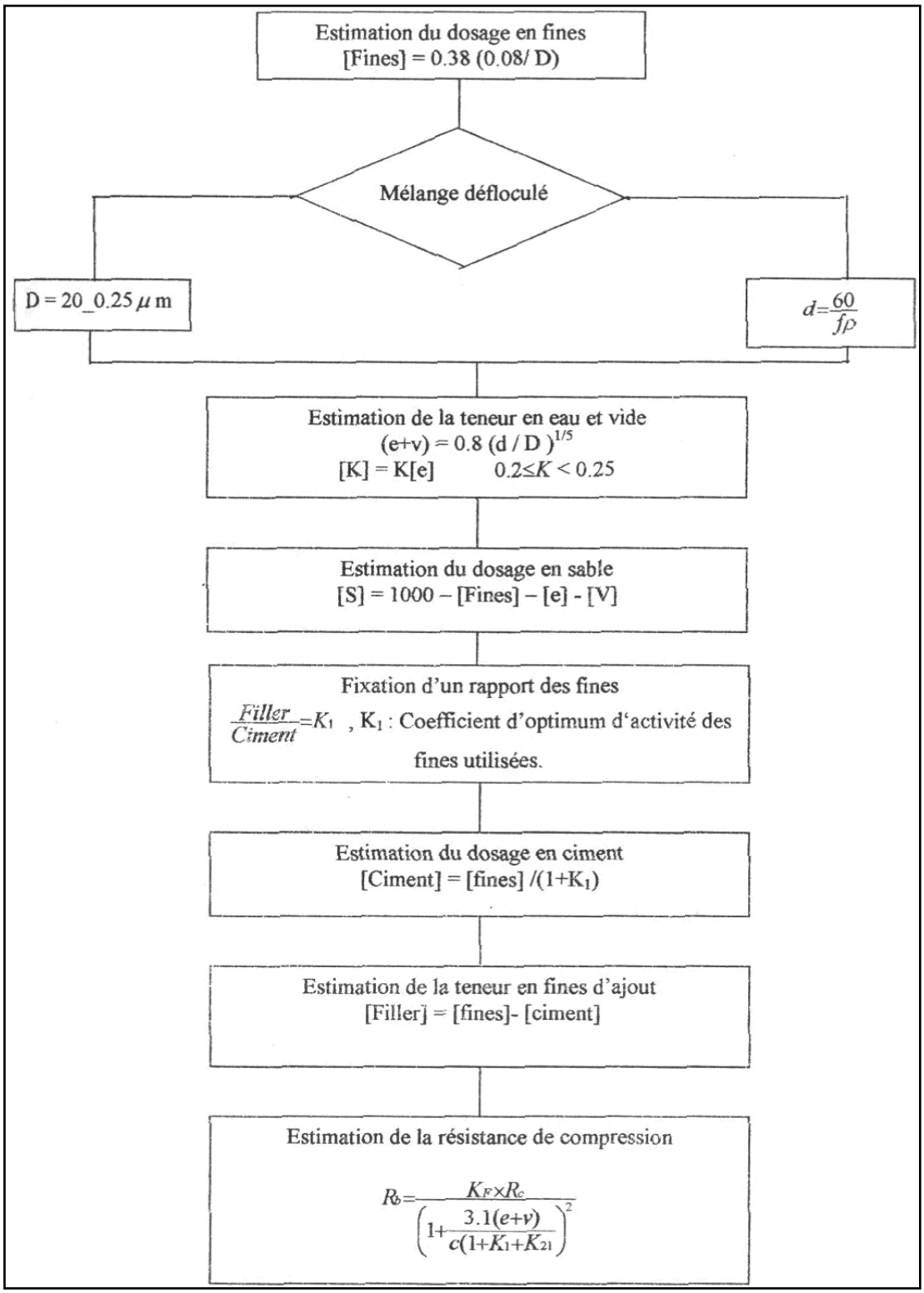


***Figure I.17** : Organigramme de la méthode de la formulation théorique du béton de sable* **[30]**.

La méthode de formulation de béton de sable (BS), en fixant l'ouvrabilité et la résistance, consiste à choisir les composants et à les proportionner pour obtenir des propriétés spécifiques. Pour les bétons, il existe de nombreuses méthodes permettant de viser ces deux propriétés essentielles, généralement en contrôlant la taille des plus gros grains des granulats. Cependant, pour les BS, qui font partie des nouveaux bétons avec des propriétés spécifiques telles que la finesse et l'ouvrabilité, la démarche de formulation demeure principalement empirique. Différentes approches ont été envisagées pour évaluer les caractéristiques de résistance, tandis que la prise en compte de l'ouvrabilité comme critère de formulation reste complexe.

Les BS, composés principalement de sable à surface spécifique élevée, nécessitent une quantité supplémentaire d'eau et de ciment. Cependant, les effets négatifs d'une forte teneur en ciment sur le coût et d'une teneur élevée en eau sur les propriétés mécaniques et le retrait sont bien connus. Par conséquent, il est judicieux de remplacer une partie du ciment par des fillers et de limiter la quantité d'eau en ajoutant des adjuvants tels que des superplastifiants. En conclusion, la formulation d'un BS nécessite une combinaison des deux paramètres : ouvrabilité et compacité.

Dans la plupart des recherches consultées **[1, 5, 31, 32]**, des formulations ont été proposées pour des matériaux spécifiques. Les formulations optimales obtenues sont généralement basées sur la combinaison des deux paramètres mentionnés précédemment : la compacité et l'ouvrabilité.

I.2.7. Le béton de sable fluide

Le béton de sable fluide (BSF) ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BSF s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BSF minimise le risque de ségrégation **[5]**.

La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants superplastifiants afin d'éviter l'ajout excessif et incontrôlé de l'eau, qui entraîne une diminution des performances physico-mécaniques et de la durabilité. Pour que les bétons de sable fluides soient homogènes et stables vis-à-vis du phénomène de ségrégation et de ressuage, l'utilisation des éléments fins ou d'un adjuvant de viscosité est obligatoire **[4]**.

Les BSF sont intéressants pour certaines applications en génie civil comme les pieux forés, les injections et les reprises en sous-œuvre. Les BSF sont économiquement mieux adaptés aux dallages du bâtiment. S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient et l'autonivellement est un atout considérable **[4]**. L'intérêt réside dans les avantages suivants :

- ✓ Rapidité et simplicité d'exécution ;
- ✓ Limitation des moyens en personnel et en matériels ;
- ✓ Nuisances réduites (absence de vibration).

Dans le cas des aménagements de voirie peu dénivelés (comme les aires de stationnement et les voies piétonnes), où les performances demandées ne seront pas élevées, elles se prêtent parfaitement à la technique de fluidification de BS. Les BSF présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques, dont l'utilisation semble se développer actuellement. Indépendamment de l'aspect environnemental lié à l'utilisation des BS, il pourra être mieux adapté aux cas suivants **[1**, **4]**:

- ✓ Risques de ségrégation préjudiciables ;
- ✓ Forte densité de ferraillages ;
- ✓ Recherche d'un produit fini.

Le BSF présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les BSF nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques. Indépendamment de l'aspect économique et des gains de productivité, le BSF peut être une meilleure adaptation à plusieurs applications mal assurées par les bétons traditionnels **[1**, **33]**.

Autre définition du béton de sable fluide, d'après les définitions de Guendouz et Boukhelkhal **[1]** et Bouziani et al. **[5]**, le béton de sable fluide (BSF) fait partie de ces

nouveaux matériaux de construction et a été plus largement accepté ces dernières années. Il est défini comme un béton qui combine les caractéristiques du béton de sable avec une fluidité suffisante pour s'adapter à l'état actuel du développement des constructions de génie civil. Ce type de béton, devenu possible grâce à l'élaboration de superplastifiants performants, peut s'écouler sans problème. Le BSF peut s'écouler et se consolider sous son propre poids sans aucune consolidation externe. Il s'agit d'un nouveau type de béton qui se caractérise par une homogénéité adéquate et l'absence de ségrégation ou de ressuage. La grande fluidité du BSF facilite son pompage et sa mise en place dans des zones difficilement accessibles. pompage et la mise en place dans des zones difficilement accessibles ainsi que dans des pièces complexes et lourdement armées. La fluidité élevée du BSF facilite sa pompabilité et sa mise en place dans des zones difficilement accessibles ainsi que dans des pièces complexes et fortement armées, ce qui permet d'obtenir un niveau élevé de finition de surface et de durabilité des structures. Par conséquent, l'utilisation du BSF dans la construction de bâtiments ou de routes ne peut être négligée.

I.2.8. Exemples d'applications des bétons de sable fluide

Les bétons de sable fluide (BSF) affirment progressivement leurs performances au fil des réalisations sur chantiers et en usine de préfabrication, et ils sont en passe de remplacer, dans de nombreuses applications, les bétons traditionnels mis en œuvre par vibration. Les BSF peuvent être utilisés aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantiers, qu'il s'agisse de bâtiments ou de génie civil, et pour l'exécution des tunnels ainsi que de nombreux produits préfabriqués en béton, ainsi que dans les travaux d'assainissement et de réhabilitation. La plupart des ouvrages, tels que les voiles, les poteaux, les piles, les poutres, les planchers, les dalles (voir la figure I.18) , les dallages, les fondations, les éléments de façade, etc., peuvent être réalisés en BSF. Les BSF sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est difficile **[33]**.

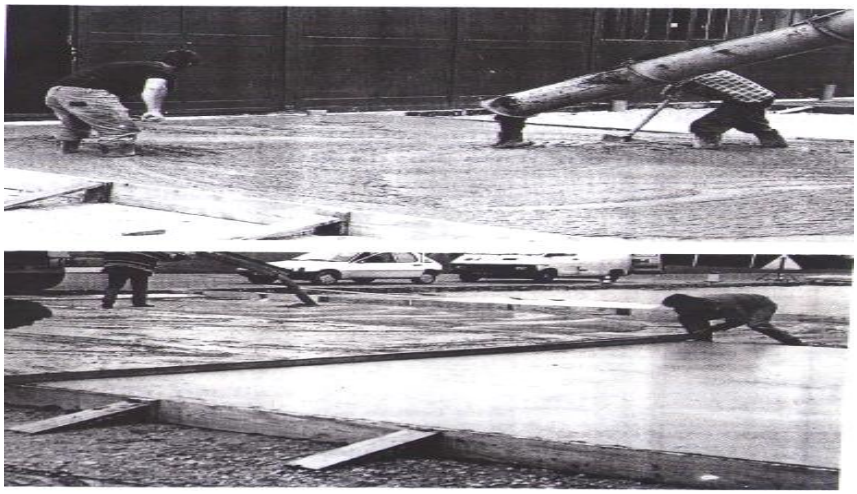


Figure I.18 *: Dallage en béton de sable fluide (Base aérien de Dijon)* **[33]**.

I.2.8.1.Exemples d'applications des bétons de sable fluide en l'Algérie

Jusqu'à présent, aucun ouvrage n'a été érigé par le BSF, étant donné que ce matériau n'a pas encore été standardisé sur le plan réglementaire. Cependant, , il peut y avoir quelques cas de construction où le béton adjuvant a été utilisé en introduisant soit des plastifiants soit des superplastifiants, mais pas pour autant que ça soit du béton de sable fluide. Ce type de béton repose plutôt sur les travaux de recherche menés par plusieurs chercheurs au sein des universités algériennes, qui ont abouti à diverses réalisations. Parmi ces recherches, on peut citer :

Guendouz et al. **[34]** ont étudié la possibilité de recycler les déchets de carreaux de sol comme granulat fin dans la fabrication de béton de sable fluide (BSF). Pour ce faire, le sable est remplacé par des déchets de carreaux de sol à différents pourcentages (0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 %) pour évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques. Les résultats obtenus montrent que certaines caractéristiques physiques et mécaniques des mélanges BSF avec des déchets de carreaux de sol sont meilleures que celles du béton de sable fluide conventionnel. Cette étude assure également que la réutilisation des déchets de carreaux de sol dans le BSF constitue une approche positive pour réduire le coût des matériaux et résoudre certains problèmes environnementaux.

Guendouz et Boukhelkhal **[1]** ont orienté leur recherche vers l'utilisation des déchets céramiques de carrelage et les articles sanitaires en céramique, sur les propriétés du béton de sable fluide (BSF). Pour ce faire, différentes fractions volumiques de sable (10 %, 20 %, 30

%, 40 %, 50 % et 60 %) ont été substituées par les mêmes volumes de granulats de déchets céramiques. Les propriétés physico-mécanique ont été étudiées. Les résultats ont montré que le diamètre d'écoulement de l'affaissement diminuait jusqu'à 100 et 120 mm et que le temps d'écoulement augmentait jusqu'à 35 et 32 s pour les BSF contenant respectivement 60 % de déchets céramiques de carrelage ou d'articles sanitaires en céramique. Cependant, les résistances mécaniques des BSF sont améliorées en fonction de la substitution du sable par des déchets céramiques, avec un optimum de 60% et 50% respectivement pour les déchets céramiques de tuiles et les déchets sanitaires en céramique.

Bouziani et al. **[5]** ont analysé l'effet du sable de dune sur les propriétés du béton de sable fluide (BSF) préparé avec différentes proportions de sables de dune et de rivière. Il a montré, selon leurs résultats obtenus, qu'une teneur optimale en sable de dune, qui satisfait les propriétés fraîches et durcies des BSF, est obtenue. En outre, l'indice d'écoulement obtenu calculé à l'aide du modèle de viscosité en loi de puissance est corrélé avec succès aux résultats expérimentaux du temps d'écoulement. Bouziani et al. **[35]** ont fait une recherche expérimentale sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons de sable fluides (BSF) renforcés par des fibres de polypropylène (FP). Les résultats obtenus indiquent que tous les mélanges étudiés ont un comportement pseudo-plastique à l'état frais et peuvent être bien ajustés à l'aide d'un modèle de loi de puissance. Les résultats confirment également que l'incorporation de PF augmente la viscosité et réduit le retrait libre du BSF. En termes de résistance mécanique, les résultats montrent que l'incorporation de FP améliore la résistance à la flexion. Cependant, une réduction de la résistance à la compression est observée.

Bouziani et al. **[32]** ont étudié l'effet de la teneur en poudre de marbre (PM) sur les propriétés du béton de sable autoplacant (BSA). Les résultats rhéologiques et mécaniques obtenus montrent que l'augmentation de la teneur en PM dans les BSA, de 150 kg/m^3 à 350 kg/m^3, améliore les propriétés à l'état frais en réduisant le temps d'écoulement en entonnoir en V (de 5 s à 1,5 s) et en augmentant l'affaissement du mini-cône (de 28 cm à 34 cm). L'utilisation de 250 kg/m^3 de PM permet d'atteindre la viscosité initiale la plus élevée tout en conservant une bonne fluidité à des vitesses de rotation élevées, par rapport aux teneurs en PM de 150 kg/m^3 et 350 kg/m^3. D'autre part, la résistance à la compression à 28 jours diminue avec l'augmentation de la teneur en PM.

I.3.VALORISATION DE DECHETS DE COQUILLAGE COMME ÉCO-MATERIAUX CIMENTAIRES DANS L'INDUSTRIE DU BETON

Les déchets provenant de diverses filières marines sont encore trop peu valorisés et sont souvent destinés à la décharge. Cependant, le matériau béton peut jouer un rôle positif dans l'économie circulaire en incorporant ces déchets lorsque leurs caractéristiques le permettent. Cette approche permet d'obtenir des matériaux présentant des 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 déchets, mais la question qui se pose est **qu'est-ce qu'un déchets ?** « Un déchets, c'est une matière intentionnelle et inévitable créée au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit final (papier, industrie des matériaux de construction,…) ». Cependant, on ne peut pas envisager de mettre n'importe quel déchets dans n'importe quel béton sans étude préalable.

Le béton est aujourd'hui l'un des matériaux de construction largement utilisés, avec l'émergence de plusieurs types au cours des dernières années, notamment les bétons autoplaçants (BAP), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons de sable et les bétons de sable fluide (BS et BSF), les bétons de fibres (BF) et les bétons innovants (BI). Cette diversité témoigne à la fois de la créativité des architectes et de l'évolution des besoins de construction. Ces progrès considérables dans le domaine du béton se traduisent par des avantages à tous les niveaux, y compris sur le plan du coût global de la construction durable.

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique a été présentée, mettant en évidence les principaux travaux de recherche liés à notre sujet de recherche, sur les éco-matériaux en présentant tout d'abord le contexte environnemental au sens large, puis en se recentrant sur l'utilisation de la poudre de coquillage (PC) comme un éco-liant dans l'industrie du béton.

I.3.1.Environnement et ressources

Actuellement, notre planète connaît les températures les plus élevées jamais enregistrées depuis le début de l'ère industrielle, avec une augmentation constante de la température moyenne à la surface de la terre. Ce phénomène est attribué au réchauffement climatique, qui se produit en raison de la présence croissante de gaz à effet de serre (GES) dans les couches stratosphériques de notre atmosphère. Ce réchauffement climatique entraîne des changements significatifs dans le climat, ce qui se traduit par une augmentation des événements

météorologiques extrêmes. Le principal gaz responsable de cet effet de serre supplémentaire est le dioxyde de carbone (CO_2), dont les émissions peuvent être d'origine naturelle ou anthropique **[36, 37]**.

En 2019, les émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre (GES), principalement le CO_2, ont été estimées à 42,2 Gt ± 3,3 Gt **[38]**. Dans le domaine des ressources naturelles, en 2017, l'extraction et l'utilisation de matières premières de toutes sortes étaient responsables de 30 Gt de CO_2 et pourraient atteindre 50 Gt de CO_2 d'ici 2060, représentant ainsi les deux tiers des émissions totales prévues pour 2060. Ces émissions sont directement liées à l'extraction et à l'utilisation à grande échelle de matières premières. En effet, les extractions de matières premières, y compris la biomasse, les énergies fossiles, les métaux et les non-métaux, ont atteint 89 Gt en 2017, dont 44 Gt pour les non-métaux et 22 Gt pour la biomasse. Selon les projections de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), cette consommation atteindrait 167 Gt d'ici 2060 si aucune mesure n'est prise pour optimiser l'utilisation des ressources et promouvoir l'économie circulaire **[39]**. L'extraction de matières premières non métalliques atteindrait alors 86 Gt **[40]**.

En plus des émissions de gaz à effet de serre, ces extractions soulèvent également des préoccupations quant à la gestion des ressources naturelles. Les ressources naturelles sont essentielles à la survie humaine et aux activités économiques. Elles peuvent être classées en deux catégories :

a) Les ressources naturelles renouvelables

Les ressources naturelles renouvelables sont celles qui peuvent se régénérer en permanence et donc être exploitées sans risque d'épuisement. Elles comprennent des éléments tels que l'eau, les terres arables, les ressources biologiques comme les forêts et les pâturages, ainsi que les ressources génétiques telles que les variétés de plantes et les espèces animales. Cependant, ces ressources restent renouvelables seulement si le taux de prélèvement reste inférieur à la productivité disponible **[36]**.

b) Les ressources naturelles non renouvelables

Proviennent de gisements formés au cours de l'histoire géologique de la Terre, constituant ainsi des stocks épuisables. Ces ressources comprennent des éléments tels que les combustibles fossiles (comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon), les minéraux métalliques (comme le fer, le cuivre et l'aluminium) et les minéraux non métalliques (comme le sel, le sable

et le gravier). Une fois exploitées, ces ressources ne peuvent pas être régénérées sur une échelle de temps humain significative **[36]**.

Pendant longtemps, toutes ces ressources semblaient inépuisables. Cependant, la croissance démographique mondiale ainsi que les modes de vie adoptés par une partie de la population ont finalement conduit à leur raréfaction, même pour celles qui sont indispensables à la vie des populations. De nos jours, les ressources biologiques, qui sont réputées renouvelables, sont exploitées à des niveaux si élevés qu'elles n'ont plus le temps de se régénérer. Par exemple, l'eau et les sols ne peuvent plus être considérés comme renouvelables, étant donné que les disponibilités en eau sont déjà insuffisantes dans 55 pays en développement. De plus, l'érosion des sols, causée par de mauvaises pratiques agricoles, la déforestation ou le surpâturage, risque de provoquer une perte de 30 % des surfaces agricoles d'ici à 2050 **[41]**.

Pour ce qui est des matières premières minérales, les énergies fossiles comme le pétrole ou le gaz naturel risquent de s'épuiser d'ici 2050 au rythme actuel de consommation. Plus spécifiquement dans le domaine de la construction, le sable et le gravier, qui sont aujourd'hui essentiels à la construction, sont les ressources naturelles les plus extraites dans le monde chaque année, avec 44 Gt extraites en 2017, dépassant ainsi ce que la planète peut produire en une année. Cette consommation pourrait doubler d'ici 2060 en raison de l'émergence économique de pays tels que la Chine, l'Inde ou l'Indonésie. L'extraction de ces granulats, qu'ils soient sous forme roulée ou concassée, entraîne également des perturbations environnementales importantes telles que la destruction d'écosystèmes ou l'érosion côtière **[35, 42]**. Cette situation a incité les scientifiques et les organisations internationales à promouvoir une utilisation rationnelle et une conservation des ressources naturelles afin de permettre à l'humanité de réaliser un développement durable. Dès 1980, l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) a proposé une «*Stratégie mondiale de la conservation*» visant à maintenir la capacité de la Terre à assurer à la fois le développement durable de l'humanité et la pérennité de toute forme de vie **[43]**.

En 1987, cette stratégie a été complétée par le rapport Brundtland, qui a repris ces questions cruciales en mettant l'accent sur les aspects économiques du problème et en définissant également la notion de développement durable. Le troisième « *Sommet de la Terre*» à Rio de Janeiro en 1992 a conduit à la signature de l'agenda 21 par 173 chefs d'État et à la définition du développement durable à travers les «Trois piliers» qui doivent être conciliés dans

une perspective de développement durable : le progrès économique, la justice sociale et la préservation de l'environnement (voir la figure I.19) **[44]**.

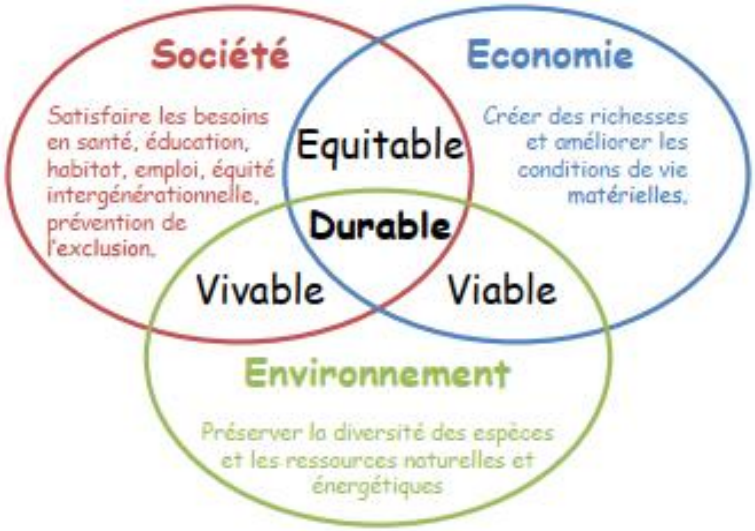


Figure I.19** : Les trois piliers du développement durable[44]**.

I.3.2. La construction durable

Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) **[45]**, le secteur du bâtiment consomme plus de 32 % de l'énergie produite mondialement, génère un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre et produit environ 136 millions de tonnes de déchets par an, dont la moitié peut être attribuée au secteur de la démolition **[46, 47]**. En France, selon le rapport grand public du Haut Conseil pour le climat paru en juin 2021, les émissions de dioxyde de carbone liées aux bâtiments représentent 17 % des émissions territoriales de la France en 2019, ce qui classe ce secteur à la quatrième place derrière les transports (31 %), l'industrie (19 %) et l'agriculture **[47, 48]**.

Le secteur de la construction est également un grand consommateur de matières premières naturelle, en particulier de sable et de gravier (sous forme roulée ou concassée), indispensables à la fabrication du béton. En 2017, ces matériaux représentaient 24 % des matières premières extraites dans le monde **[40]**. Les autres matériaux utilisés dans la construction de bâtiments, d'infrastructures ou de routes, tels que le bitume et le bois, font partie des 15 matériaux non métalliques les plus extraits. En France, en 2018, l'extraction de sable et de gravier représentait 90 % des matières premières minérales extraites sur le territoire, soit 343 millions de tonnes **[49]**.

La construction durable, en émergence du discours sur le développement durable, repose donc sur les mêmes principes, incluant les trois dimensions de base : la société, l'environnement et l'économie, tout au long du processus de construction et de vie du bâtiment. Cela se traduit par un changement des préoccupations principales initiales du domaine de la construction (performances, coûts, qualité) vers des préoccupations environnementales (épuisement des ressources naturelles, pollution environnementale, qualité sanitaire de l'environnement). La construction durable répond à ces critères grâce aux principes suivants **[50]**:

- Minimiser la consommation de ressources naturelles,
- Maximiser la réutilisation des ressources naturelles,
- Utiliser des ressources renouvelables ou recyclables,
- Protéger l'environnement naturel vis- à-vis la pollution ,
- Créer un environnement sain et non toxique,
- Rechercher la qualité dans la création de l'environnement bâti.

I.3.3. Les éco-matériaux

En 2015, les quantités de matières premières consommées en Algérie pour la production de bâtiments neufs étaient estimées à 51 millions de tonnes, dont 43 millions de tonnes pour le secteur du logement **[51]**. Le béton représente 85 % des ressources consommées dans le secteur du bâtiment en Algérie, tandis que la terre cuite (briques, tuiles) ne compte que pour 60 % et l'acier pour 2 %. En ce qui concerne le réchauffement climatique, la production de fer, d'acier et de ciment est associée à 44 % des émissions de carbone de l'industrie, la production de ciment représentant 4 à 6 % des émissions de CO_2 mondiales **[51]**. Ce fort impact environnemental est attribué à l'origine même du ciment, qui repose sur la décarbonatation du calcaire, ainsi qu'à la combustion d'énergie fossile lors de la fabrication, des processus d'extraction et de préparation **[52]**.

Absolument, la construction durable nécessite inévitablement une évolution des matériaux de construction en agissant sur plusieurs aspects, notamment les procédés de production, le recyclage, la substitution de certains matériaux ou matières premières, le développement de méthodes de construction innovantes, de procédés de désassemblage et de déconstruction, ainsi que l'utilisation de matériaux innovants et respectueux de l'environnement **[53]**.

Effectivement, de nombreuses recherches ont été menées dans le but de réduire l'impact carbone associé au ciment. Cela a impliqué le remplacement du clinker par des additions telles que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, les pouzzolanes, les fumées de silice, le métakaolin, ainsi que les fillers siliceux ou calcaires. Ces efforts ont conduit à la fabrication de ciments de types CEM II, III, IV ou V, tels que définis selon la norme NF EN 197-1 **[54]**. En conséquence, l'impact carbone du ciment a pu être réduit, passant de 815 kg de CO_2 par tonne pour le CEM I à des valeurs moindres pour les autres types de ciment. Il est cependant important de noter que cette dernière valeur doit être nuancée, car elle est principalement influencée par le processus de fabrication du ciment, qui est associé à des impacts environnementaux élevés **[55]**.

Une autre approche consiste à développer des liants à faible impact environnemental en remplacement partiel ou total du ciment. Ces éco-matériaux minéraux s'intègrent dans une démarche d'éco-conception, où les aspects environnementaux sont pris en compte dès leur conception et leur développement. L'objectif est de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie. Les catégories d'impacts environnementaux pouvant être évaluées grâce à une analyse du cycle de vie (ACV) sont nombreuses, mais onze catégories principales sont généralement retenues pour un matériau de construction (tableau I.2). Parmi celles-ci, le potentiel de réchauffement climatique est généralement considéré comme le critère le plus important **[56]**.

Tableau I.2 *:Catégories d'impacts environnementaux et leurs unités prises en compte par la méthode CML-IA* **[56]**.

Environmental indicators	Unit
Abiotic Depletion	kg Sb eq
Abiotic Depletion (fossil fuels)	MJ
Global Warming Potential (GWP 100a)	kg CO_2 eq
Ozone Layer Depletion	kg CFC-11 eq
Human Toxicity	kg 1,4-DB eq
Fresh Water Aquatic Ecotoxicity	kg 1,4-DB eq
Marine Aquatic Ecotoxicity	kg 1,4-DB eq
Terrestrial Ecotoxicity	kg 1,4-DB eq
Photochemical Oxidation	kg C_2H_4 eq
Acidification	kg SO_2 eq
Eutrophication	kg $(PO_4)^{3-}$ eq

Les liants minéraux alternatifs sont généralement élaborés à partir d'argiles calcinées, de sous-produits industriels ou de déchets, qui sont associés à des impacts environnementaux

moindres par rapport au clinker. Contrairement au ciment, qui est capable de former un liant par réaction chimique avec l'eau, ces nouvelles matières premières nécessitent généralement un activateur pour déclencher une réaction chimique. Cette réaction peut être de type hydraulique, pouzzolanique ou géopolymérique. Souvent de nature calcique, sulfurique ou alcaline, l'identification et la quantification des impacts environnementaux de ces différents activateurs, en complément des performances mécaniques des matériaux fabriqués, permettent de situer les liants obtenus dans une démarche d'éco-conception **[56, 57]**.

I.3.4.Valorisation des déchets

La valorisation implique diverses étapes telles que la collecte, le transport, le stockage, le tri et le traitement des déchets afin de récupérer des matériaux réutilisables, de l'énergie ou de disposer de manière écologique des produits restants. Avant de procéder à la valorisation d'un déchet, il est essentiel de comprendre son origine, de l'analyser, de caractériser son état actuel et de prédire son comportement dans le temps. Cela nécessite une évaluation de sa traitabilité. Ainsi, il est nécessaire de «mesurer pour connaître et connaître pour agir». En adoptant une approche holistique, nous pouvons déterminer le meilleur mode de valorisation pour chaque type de déchet, en tenant compte de leur devenir ultime **[58, 59]**.

I.3.4.1. Définition de déchets

Le terme «déchets» peut revêtir différentes définitions, variant selon le contexte et le cadre législatif, et cela peut varier d'un auteur à l'autre et d'un pays à l'autre. Selon le Programme des nations unies pour le développement 2 (2009) et l'article 3 du journal officiel de la république algérienne, dans la loi N° 01-19 du 19 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. Un déchet est défini comme suit : «tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, ainsi que toute substance, produit ou bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer» **[58]**.

Ce terme revêt différentes significations selon les perspectives économique, juridique, sociologique, politique, environnementale et systémique. Parmi celles-ci, deux définitions se distinguent, mettant en lumière la valeur économique des déchets et les enjeux juridiques qui entourent sa gestion future **[58]**.

a) Définition économique

Sur le plan économique, un déchet est défini comme une matière ou un objet ayant une valeur économique nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné, nécessitant soit une élimination personnelle, soit le paiement de quelqu'un d'autre pour le faire. Bien que cette définition ne soit pas exhaustive, elle exclut une partie des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique et peuvent être utilisés comme matières premières ou secondaires dans la production d'autres produits, voire comme biens pour la communauté, aussi bien dans les pays développés ou industrialisés que dans les pays en développement **[39]**.

b) Définition juridique

Au niveau juridique, deux conceptions sont généralement considérées : la conception subjective et la conception objective. Selon la conception subjective, un bien devient un déchet dès lors que son propriétaire exprime l'intention de s'en débarrasser. Tant que ce bien n'a pas quitté la propriété du détenteur ou l'espace qu'il occupe, il reste sous sa responsabilité. Cependant, une fois que le bien est déposé dans une poubelle ou sur la voie publique, il devient également la propriété de la municipalité, puisque cet acte indique la volonté d'abandonner tout droit de propriété. En revanche, selon la conception objective, un déchet est défini comme un bien dont la gestion doit être réglementée dans le but de protéger l'environnement et la santé publique, indépendamment de la volonté du propriétaire ou de sa valeur économique. Ainsi, le détenteur d'un bien est tenu de respecter la réglementation et ne peut se soustraire à ses responsabilités à l'égard de ce déchet sous prétexte de sa valeur économique **[59]**.

I.3.4.2. Classification des déchets

I.3.4.2.1. Classement selon l'origine et l'activité du déchet

a) Les déchets ménagers et assimilées

Les déchets ménagers et assimilés englobent les déchets produits par les ménages, les commerçants, les artisans, voire même les entreprises et les industries, lorsqu'ils ne présentent pas de caractère dangereux ou polluant. Cela inclut des matériaux tels que le papier, le carton, le bois, le verre, les textiles et les emballages **[59]**.

b) Les déchets industriels

Ces type de déchets comprennent des matériaux de nature et de composition diverse et donc on distingue :

- ***Les déchets industriels banals (non dangereux) :*** Ces déchets comprennent une variété de matériaux tels que le papier, le carton, le plastique, le verre, ainsi que la matière organique d'origine végétale ou animale. Dans un sens plus large, ces déchets englobent à la fois les déchets municipaux et ceux qui peuvent être valorisés par le recyclage, la fermentation ou l'incinération avec récupération d'énergie. Ils sont généralement non toxiques ni dangereux, et peuvent être traités ou stockés dans les mêmes installations que les déchets ménagers **[60]**.
- ***Les déchets industriels spéciaux (dangereux) :*** Ces déchets présentent un pouvoir polluant significatif du fait de la présence d'éléments toxiques en quantités variables, ce qui engendre des nuisances. Par conséquent, il est essentiel de les traiter et de les stocker correctement pour prévenir les impacts néfastes sur l'environnement et la santé publique **[60]**.

c) Les déchets marins

Les déchets marins désignent tous les matériaux ou objets qui sont intentionnellement ou involontairement jetés ou abandonnés en mer, que ce soit directement ou indirectement. Ils se retrouvent dans tous les compartiments du milieu marin, que ce soit sur les plages, en surface ou sur les fonds marins (voir la figure I.20), et sont constitués de diverses typologies**[61]**.



Figure I.20 *: Déchets marins jetés dans une carrière à Huarmey (Pérou)***[62]**.

I.3.5. Impact environnemental des déchets

La demande en matières premières augmente en raison du développement rapide de la technologie de la construction en génie civil. Après des décennies de production, le béton qui consomme une grande quantité de ces matériaux reste le matériau de construction le plus utilisé dans l'industrie de la construction à ce jour **[63]**. Par conséquent, la question qui tout jour se pose : jusqu'à quand les matières premières en diminution continuelle seront-elles suffisantes ? Étant donné que ces ressources naturelles ne sont pas renouvelables, il est impossible de déterminer leur volume exact ni la durée pendant laquelle elles peuvent être consommées sans épuisement. Ainsi,, les experts anticipent une aggravation du déséquilibre entre la demande de ces matériaux et leur disponibilité. Ainsi, il est impératif de trouver une alternative viable. De nombreux pays ont mis en avant l'importance cruciale de développer de nouveaux matériaux pour soutenir l'économie de la construction, car les sites d'enfouissement existants sont devenus insuffisants et s'épuisent rapidement. Ainsi, une corrélation a été établie entre cette problématique et la nécessité de promouvoir la récupération des déchets solides non dégradables, afin de répondre aux enjeux de durabilité, d'énergie et d'environnement simultanément **[64]**.

L'intégration des déchets dans le domaine de la construction a suscité des débats plus poussés quant à sa capacité à répondre aux critères d'économie de la consommation d'énergie et de réduction des émissions de CO_2, afin de satisfaire aux normes environnementales. Les économies d'énergie réalisées grâce au processus de recyclage sont comparables à celles de la production de granulats concassés, et les exigences énergétiques sont similaires pour les deux procédés. Il est largement reconnu que les matériaux de construction les plus couramment utilisés aujourd'hui, ainsi que les méthodes de construction associées, ne sont pas durables, entraînant d'importants impacts environnementaux tels que la consommation d'énergie, la pollution, les émissions de CO2, l'épuisement des ressources naturelles et la production de poussières. Dans le processus de production de béton, le principal contributeur aux émissions de CO_2 est l'utilisation de ciment Portland ordinaire, représentant environ 80 à 90 % des émissions totales **[65]**. D'après Viviana et al. **[66]**, la fabrication du ciment est responsable de 5% du total des émissions mondiales de CO_2. Cela souligne la nécessité d'accorder une plus grande attention au choix des matériaux **[67]**. De plus, Meddah et al. **[68]** ont mis en lumière le fait que l'augmentation de la consommation énergétique provenant de toutes les sources pourrait contribuer au changement climatique mondial. Il a également souligné que la réduction

des émissions mondiales de CO_2 pourraient être réalisée en optant pour des matériaux ayant un impact environnemental moindre **[68]**.

I.3.5.1. Production de ciment dans le monde et son émission de CO_2

Au cours des 76 dernières années, la production de ciment a augmenté d'environ 34 fois **[69, 70]**, tandis que la population n'a augmenté que d'environ 3 fois **[71]**. Ce taux de croissance est nettement plus élevé que celui d'autres produits comme l'acier (voir la figure I.21) **[72]**.

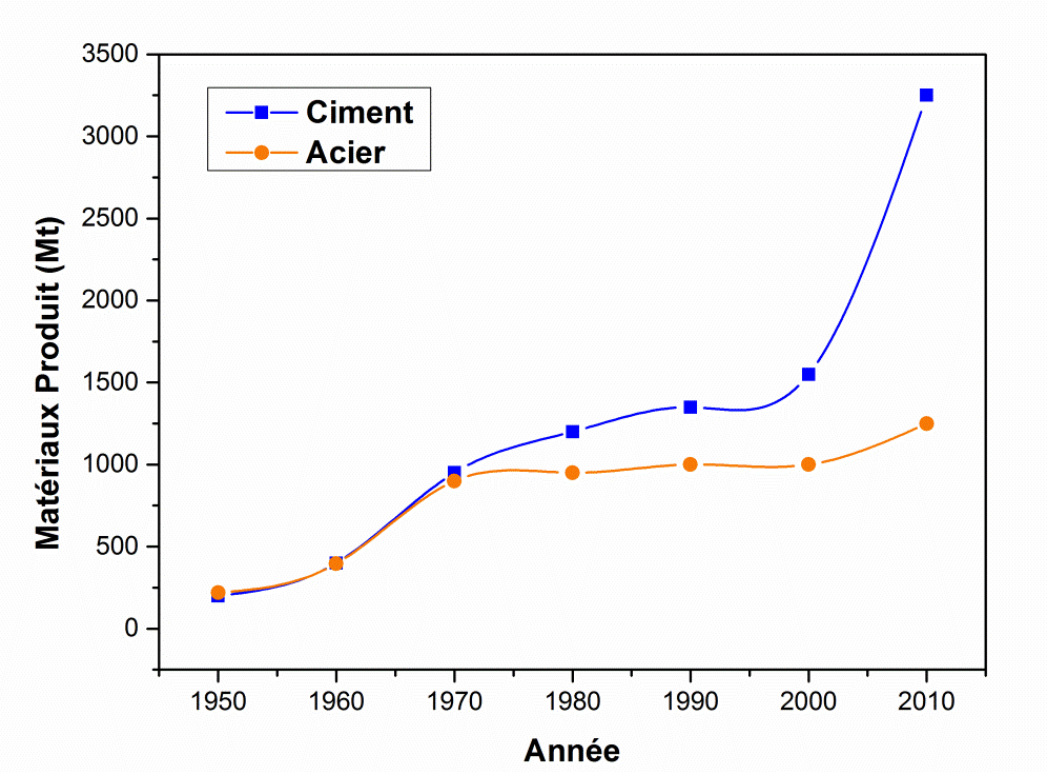


***Figure I.21**: Comparaison entre la production de ciment et l'acier par année* **[72]**.

En 2015, la production mondiale de ciment a atteint un total de 4,6 milliards de tonnes **[71]**. La figure I.22 montre l'évolution du marché mondial du ciment, suggérant la possibilité, voire la probabilité, d'une augmentation future de la production, qui pourrait avoir des implications sociales **[73]**. Cette croissance est alimentée par l'accroissement de la population et ses besoins en construction. La production de clinker, principale source de problèmes environnementaux liés à la production de ciment, notamment les émissions de carbone (CO_2), un puissant gaz à effet de serre (GES), en est largement responsable **[74]**.

La figure I.23 offre une illustration des émissions de CO_2 dans le monde attribuables à la production de ciment **[75]**.

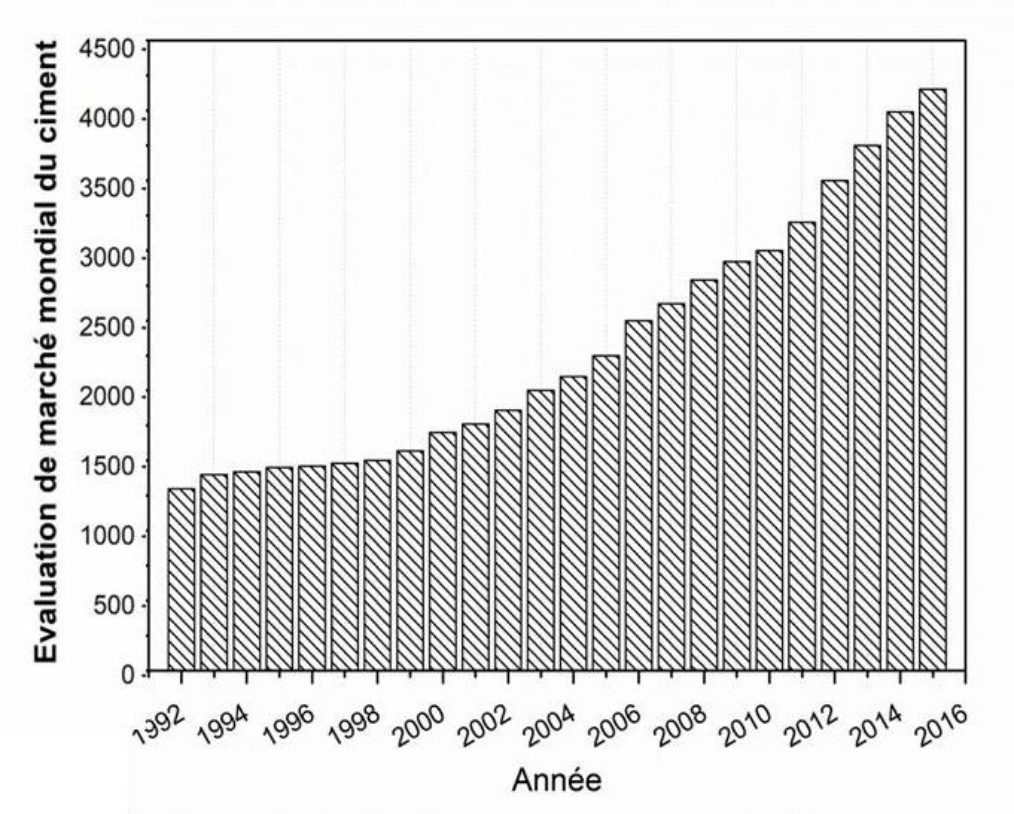


***Figure I.22**: Développement du marché mondial du ciment* **[73]**.

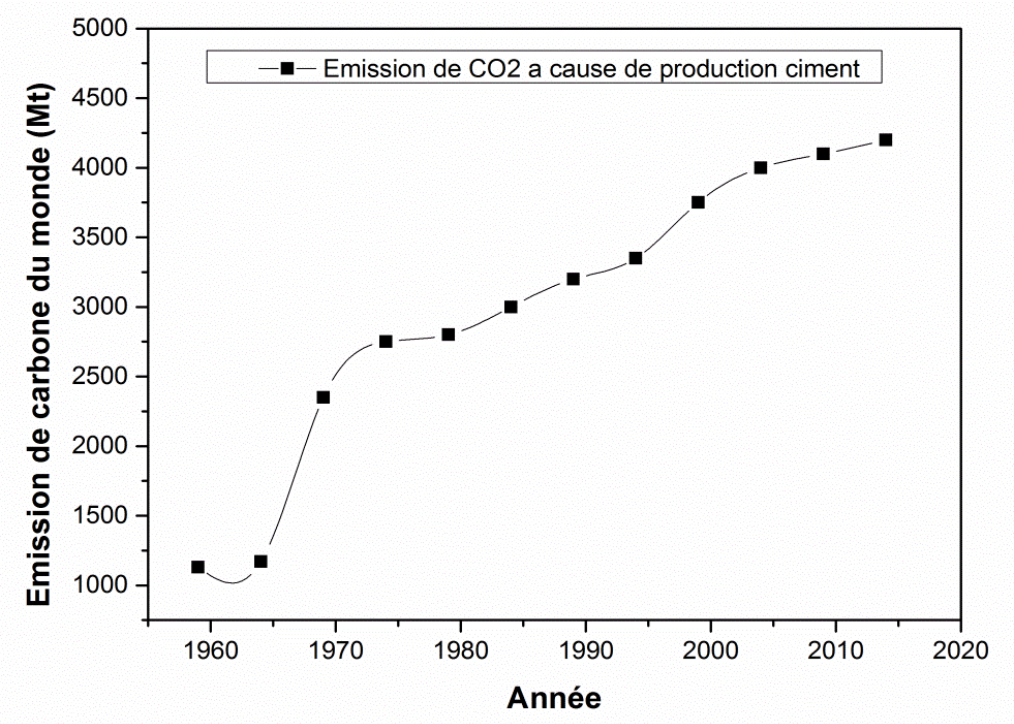


***Figure I.23**: Émission de CO_2 à due à la production du ciment* **[75]**.

I.3.5.2. Production de ciment en l'Algérie et son émission de CO_2

Selon le ministère de l'Industrie et des Mines, la production nationale de ciment devrait franchir le seuil des 25 millions de tonnes en 2017. La production nationale était de 17,5 millions de tonnes en 2010 et de 22 millions de tonnes en 2016, selon le rapport de la situation de la filière de production de ciment en Algérie **[57]**.

Entre 2015 et 2017, la capacité de production de l'Algérie, qui abrite 17 cimenteries en activité, est passée de 20 à 25 millions de tonnes grâce à la réalisation de plusieurs projets d'extension ou de nouvelles installations. Parmi ces initiatives, on compte l'extension depuis janvier 2017 de la cimenterie d'Ain El Kebira à Sétif, appartenant au groupe GICA, d'une capacité de 2 millions de tonnes par an. De plus, la cimenterie CILAS à Biskra a été mise en service en 2017, ajoutant une capacité supplémentaire de 2,7 millions de tonnes. D'autres nouveaux acteurs privés ont également contribué à cette expansion, tels que le groupe Lamouri à Biskra et l'entreprise Hamel à Adrar, chacune dotée d'une capacité de production d'un million de tonnes. D'après les données statistiques et la localisation des nouvelles usines sur la carte géographique (figure I.24), il est observé une hausse de la production de ciment, entraînant ainsi une augmentation des émissions de CO_2 **[57]**.

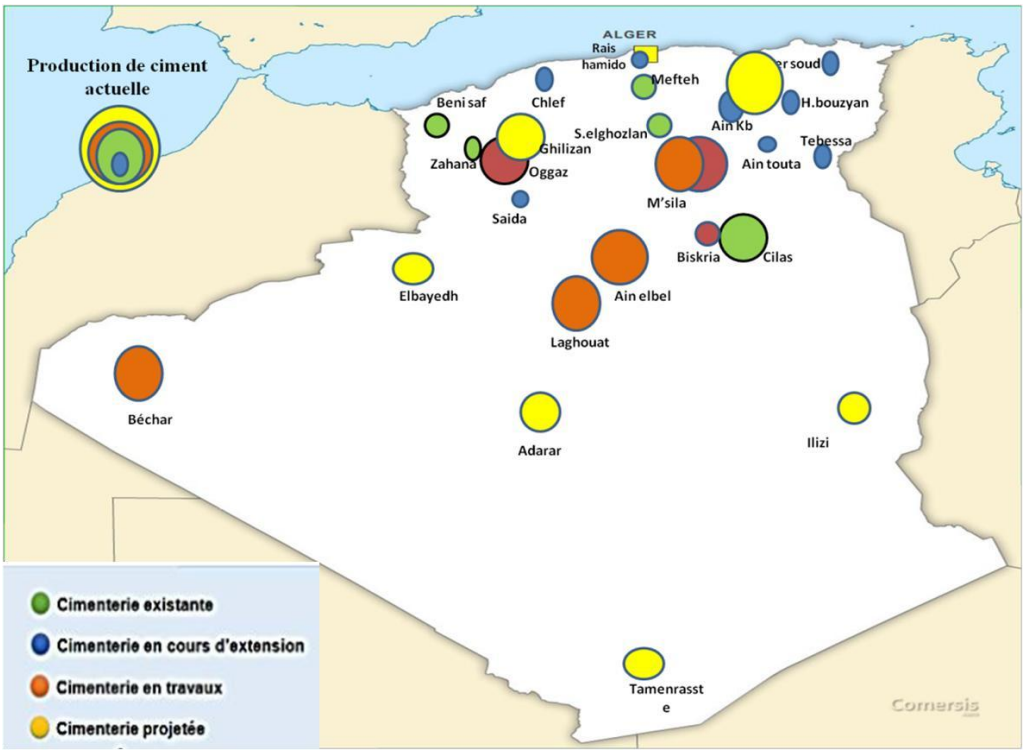


***Figure I.24**: Localisation de la production du ciment en Algérie* **[57]**.

I.3.6. Valorisation de déchets de coquillages comme ajout cimentaire dans le béton

Le ciment est la deuxième substance la plus utilisée dans le monde après l'eau. Cependant, sa production selon les méthodes conventionnelles entraîne une augmentation inacceptable des émissions de CO_2. Une solution principale pour atténuer ces émissions, proposée par l'autorité internationale de l'énergie en 2009, est le captage et le stockage des émissions de CO_2. Dans le secteur de la construction, une autre stratégie bien établie pour réduire les émissions de CO_2 consiste à remplacer partiellement le clinker par d'autres matériaux tels que la pouzzolane naturelle, la cendre volante, la fumée de silice, le laitier, la poudre de coquillage et la poudre de verre, etc. Cette approche présente l'avantage de réduire les émissions de CO_2 ainsi que la consommation d'énergie, contribuant ainsi à un environnement plus propre **[76]**.

Les déchets de coquillages qui s'accumulent sur les peuvent être utilisés comme l'un des ingrédients du béton. Ils peuvent être recyclés et traités pour être utilisés comme granulat fin, granulat grossier ou comme substitut du ciment. Les coquillages ont également été utilisés pour remplacer le ciment dans la production de bétons **[77]**. En général, les coquillages ont une teneur élevée en calcium, ce qui peut améliorer les propriétés mécaniques et physiques du béton **[78]**. Chaque année, environ 45 000 tonnes de déchets de coquillages sont produites dans le monde. Ils peuvent devenir une source d'odeurs nauséabondes en raison de la décomposition des restes de chair encore attachés aux coquilles ou de la décomposition des sels contenus dans les coquilles en gaz tels que H_2S (sulfure d'hydrogène), NH_3 (ammoniac) et en composés organiques tels que l'amine **[79]**.

Pour chaque douzaine d'huîtres (1 kg), entre 370 g et 700 g de résidus sont constitués de coquilles. Il est difficile de déterminer les quantités exactes de déchets de coquillages dans le monde. Cependant, il est certain que les quantités de déchets de coquillages sont énormes et en augmentation **[78]**. Tout au long de l'histoire, les coquillages ont été utilisés par l'homme à des fins très diverses. Ils ont servi d'instruments de musique, de ressources pharmaceutiques et médicales, d'ornements personnels, de décorations artistiques et architecturales et enfin de matériaux de construction **[80]**. Les coquillages ont été utilisés dans les mélanges de béton pour remplacer les granulats fins, les granulats grossiers ou comme matériaux cimentaires supplémentaires (MC_S) **[81]**.

Les coquillages sont classés parmi les déchets marins **[82]**. On trouve des stokes de coquillages dans divers pays, dont la Chine, l'Amérique du Sud, l'Amérique du Nord,

l'Australie, le Brésil, l'Égypte et plusieurs pays européens. L'Algérie possède un littoral étendu de 1200 km. Jusqu'à présent, en Algérie, les coquillages sont principalement utilisés comme remblais sur les littoraux. Cette section explore l'origine et les procédés pour obtenir une poudre de coquillage (PC). Elle se conclut par une revue de la littérature sur l'utilisation et les effets de la PC sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité du béton **[83]**.

La valorisation des déchets de coquillages des îles de la Madeleine implique leur transformation en matériaux cimentaires. Cette approche permettrait de leur donner une seconde vie en remplaçant partiellement le ciment et en développant des granulats fins et grossiers écologiques. Dans cette section, nous examinerons les travaux de recherche qui ont utilisé des résidus pour formuler des matériaux cimentaires écologiques. Le tableau I.3 présente quelques études de recherche publiées à travers le monde, qui ont étudié la possibilité d'incorporer différents types de coquillages dans les matériaux cimentaires (les bétons et les mortiers)**[84]**.

Tableau I.3** : Travaux de recherche sur l'incorporation des coquillages dans l'industrie du béton[84]**.

Pays	Type de coquillages	Utilisation	Références
Alegria	Coque	Remplacement du ciment	(Abdelouahed et al., 2019)**[85]**
Pérou	Coquilles péruviennes	Remplacement de granulats fins	(Varhen et al., 2017)**[86]**
Espagne	Moules	Remplacement des granulats (grossiers et fins)	(Martínez-García et al., 2017)**[87]**
France	Pétoncle	Remplacement des granulats grossiers	(Nguyen et al., 2013)**[88]**
Malaisie	Coque	Remplacement du ciment	**(**Othman et al., 2013)**[89]**

Tableau I.3 *: Travaux de recherche sur l'incorporation des coquillages dans l'industrie du béton (suit)* **[84]**.

Indonésie	Coque/Palourde	Remplacement du ciment	(Olivia et al., 2015)**[90]** (Olivia et al., 2017)**[91]**
Nigeria	Bigorneau	Remplacement du ciment	(Otunyo et al., 2013)**[92]**
Inde	Escargot	Remplacement du ciment	(Zaid & Ghorpade, 2014)**[93]**
Ghana	Escargot	Remplacement du ciment	(Nkrumah & Dankwah, 2016)**[94]**
France	Coquilles Saint-Jacques	Remplacement des granulats grossiers	(Nguyen et al., 2017)**[95]**
Thaïlande	Palourde/Moule verte/Coque/Huître	Remplacement du ciment	(Lertwattanaruk et al., 2012)**[96]**
Chine	Huître	Remplacement du ciment	(Zhong et al., 2012)**[97]**
Palestine	Palourde	Remplacement du ciment	(Tayeh et al., 2020)**[98]**

I.3.6.1. Déférents types de coquillages

Il existe de nombreux types de déchets de coquillages, tels que les coquilles d'huîtres, les coquilles Saint-Jacques, les coquilles de moules, les coquilles de sanguine et les coquilles de Palourde comme montré dans la figure I.25. Les coquilles Saint-Jacques et de gastéropodes de mollusques sont les principaux coquillages utilisés comme granulat ou comme ajout cimentaire dans le béton. La production mondiale de coquilles Saint-Jacques (16 millions de tonnes) représente environ 22 % de la production aquacole mondiale totale **[99]**. Les coquilles Saint-Jacques sont très répandues parmi les espèces de sanguine marin. Environ 87 % des sanguines cultivés sont des mollusques bivalves -33% de palourdes (y compris les coquilles et les coques), 31,3 % d'huîtres, 12,1 % de moules et 10,9 % de pectens et de mollusques bivalves.

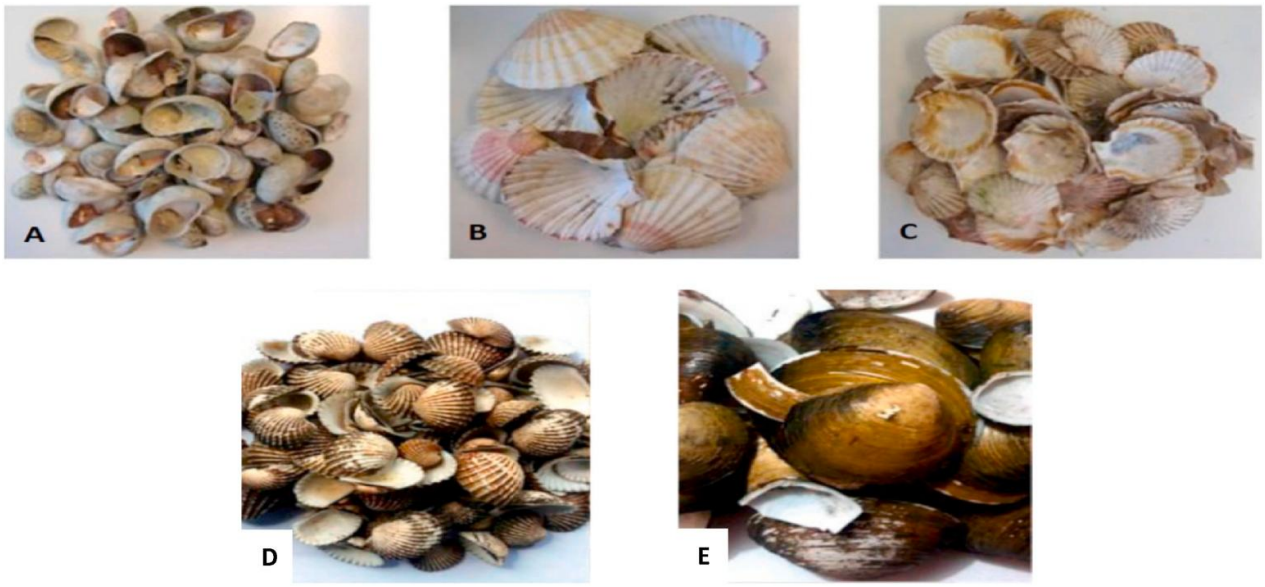


Figure I.25*: Types de coquillages : coquilles d'huîtres (a), coquilles de sanguine (b), coquilles de moules (c), coquilles Saint-Jacques (d) et coquilles de Palourde (e)* **[99]**.

I.3.6.2. Obtention de la poudre de coquillage

La poudre de coquillage est considérée comme l'un des matériaux organiques appartenant à la génération des matériaux biosourcés (biomasse), qui peuvent être utilisés comme additifs cimentaires, offrant ainsi des avantages techniques et environnementaux. Elle peut être utilisée sous forme de poudre finement broyée en tant que substitution partielle du ciment dans le béton pour améliorer ses performances grâce à la réaction pouzzolanique **[98]**.

Les coquillages sont ramassés en bord de mer (figure I.26). Ces coquillages sont soigneusement lavés à l'eau pour éliminer toute trace de sable ou de sel. Les coquillages sont immergés dans un bain d'eau vinaigrée pendant 24 heures pour réduire les traces de matières organiques. Après 24 heures, les coquilles sont lavées à l'eau et chauffées à 105 °C pendant 2 heures pour atteindre un niveau de séchage complet. Les coquilles sont broyées en poudre de coquillage blanc brut dans un concasseur de pierre afin qu'elles puissent passer le tamis 63 um (figure I.27) **[100]**.



***Figure I.26**: Processus de collecte des coquillages* **[100]**.



***Figure I.27**:Préparation de la poudre de coquillage (c) par broyage (a) et tamisage de la poudre obtenue (b) avec un tamis de 63 µm* **[101]**.

Le coquillage est produit en brûlant la poudre brute dans un four à 1000 °C pendant 2 h. Après la combustion, la couleur de la poudre devient gris clair. Le coquillage final est obtenu après refroidissement à température ambiante pendant 2 jours. La figure I.28A illustre la poudre de coquillage avant le brûlage, tandis que la figure I.28B illustre la poudre après le brûlage. Le processus de combustion des coquillages les transforme en une poudre très fine en brisant les liaisons chimiques entre les molécules. En outre, le processus de combustion des coquillages élimine la nécessité de les broyer, puisque le processus de combustion entre 700 et 900 °C donne une meilleure finesse et convertit le composé de $CaCO_3$ en CaO_2 **[93, 102-104]**. Le processus thermique est appelé décarbonatation de coquillages et peut être exprimé par l'équation suivante :

$$CaCO3 \rightarrow CaO + CO2 \qquad \text{Eq : II.1}$$

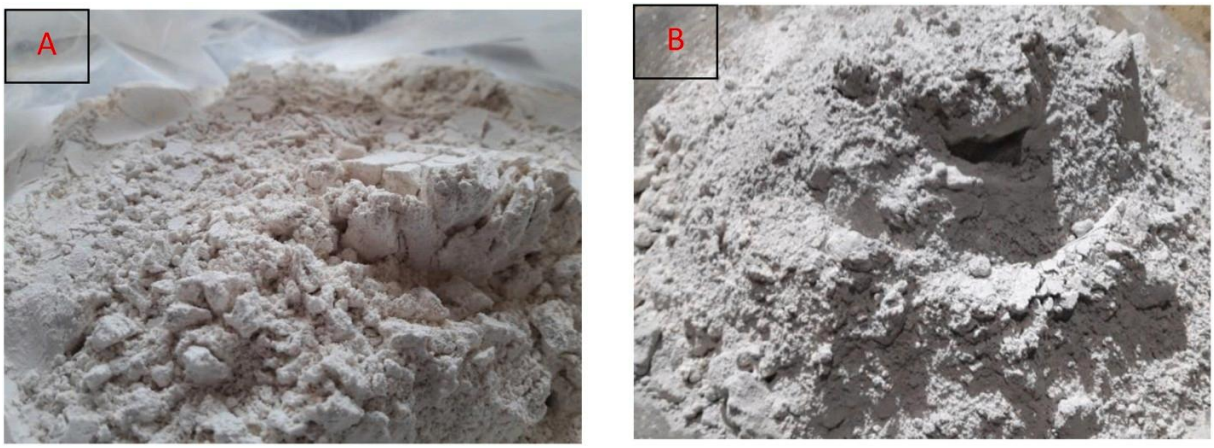


***Figure I.28**: Poudre de coquillage avant calcination (A) et après calcination (B) à 1000 °C* **[98]**.

I.3.7. Effet de la poudre de coquillages sur l'état frais du béton

I.3.7.1. Effet sur l'ouvrabilité et le temps de prise

Pour évaluer l'impact de la poudre de coquillage (PC) sur l'ouvrabilité du béton/mortier, des études antérieures ont examiné les effets de la PC en substituant une partie du poids du ciment par différents taux de substitution, puis en comparant ces mélanges aux mélanges de référence. Cependant, l'essai de prise du ciment est réalisé pour déterminer les temps de début et de fin de prise. Ces mesures sont importantes pour évaluer l'impact de l'addition des coquilles sur le temps de prise et pour établir le développement des résistances à un jeune âge. Il est crucial de noter que l'essai de prise doit être effectué dans des conditions de température constantes, car des températures élevées peuvent accélérer le processus de prise.

Tayeh et al. **[98]** ont partiellement remplacé le ciment par 5, 10, 15 et 20 % de poudre de coquillage (PC) en poids dans un mélange de béton. Le rapport eau/ciment est resté fixé à 0,58. Les résultats ont montré que les mélanges contenant de la PC (SC5, SC10, SC15 et SC20) présentaient une meilleure ouvrabilité que le mélange témoin (SC0), comme montré dans la figure I.29. De plus, les résultats observent un allongement des temps de prise initial et final avec l'inclusion de la PC. Le mélange contenant 20 % de la PC donne le temps de prise initial et final le plus long (figure I.30).

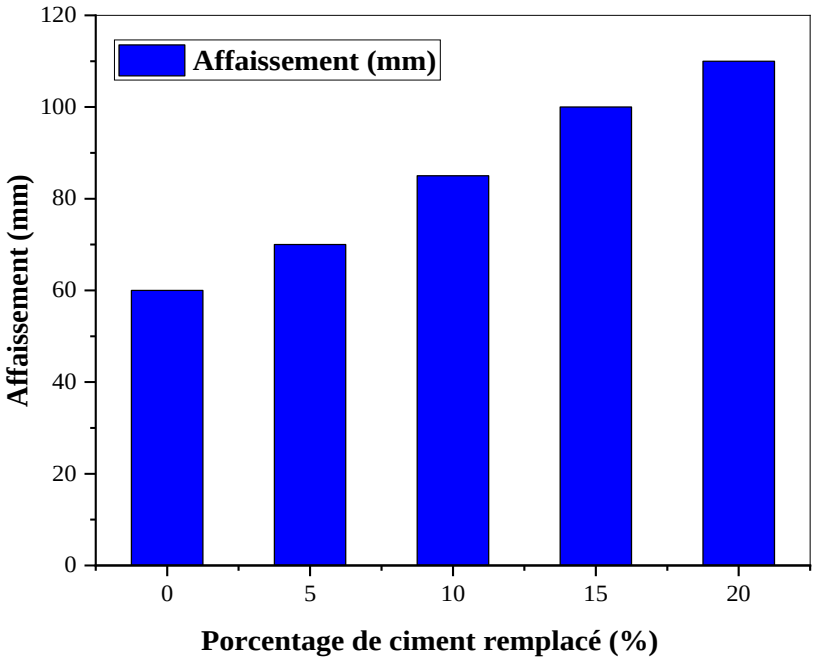


***Figure I.29**: Effet de la PC sur l'ouvrabilité du béton* **[98]**.

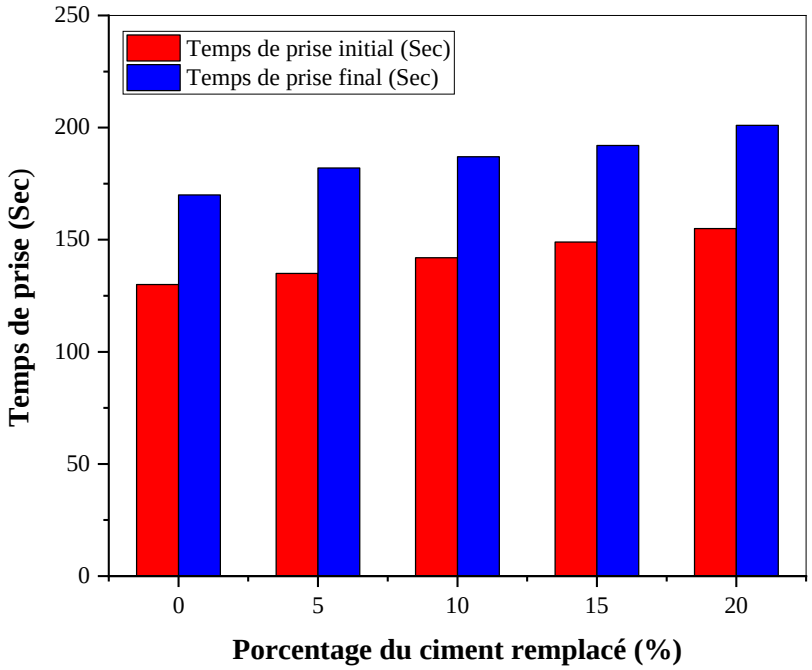


***Figure I.30**: Effet de la PC sur le temps de prise initial et final du béton* **[98]**.

Maglad et al. **[105]** ont étudié l'effet de l'utilisation de 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de la poudre de coquillages comme remplacement partiel du ciment portland ordinaire en poids sur les propriétés du béton de mousse léger. Les résultats ont montré une augmentation des temps

de prise initiale et finale à mesure que la substitution de la poudre de coquillage augmente, ainsi qu'une diminution de l'étalement du béton frais.

Ubachukwu et Okafor **[106]** ont constaté une augmentation de l'affaissement indiquant une meilleure ouvrabilité avec une augmentation de la teneur en poudre de coquillage jusqu'à 30 % dans les mélanges de béton. De plus, il a également été indiqué que l'amélioration de l'ouvrabilité du béton contenant de la poudre de coquillage présentait l'avantage de faciliter la mise en place et le compactage du béton.

Muthusamy et al. **[100]** ont trouvé que la substitution partielle du ciment dans les mélanges de béton par la poudre de coques a des niveaux de 0 %, 10 %, 20 %, 30 % et 40 % en poids. Les résultats montrent que l'utilisation de 10 % de coques en poudre augmente le temps de prise. Après l'inclusion de 10 % de coquilles de béton en poudre, le temps de prise du ciment ordinaire, qui est de 120 minutes, passe à 135 minutes. De même, le temps de prise final s'allonge, passant de 210 minutes pour la pâte de ciment à 100 % à 225 minutes pour la pâte de ciment contenant 10 % de coquilles de coques en poudre (figure I.31).

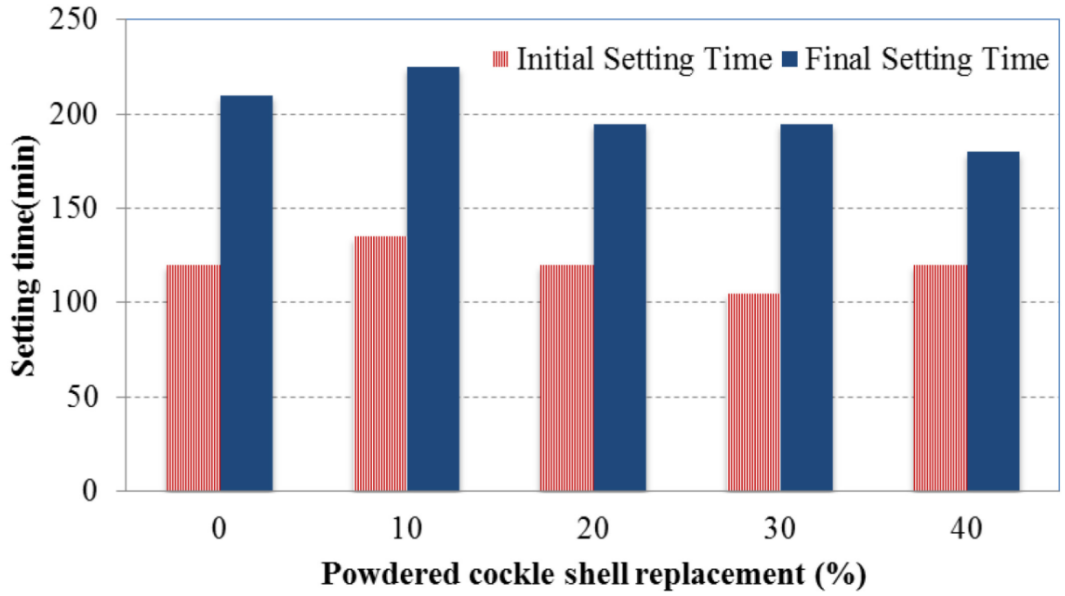


***Figure I.31**: Effet de la PC sur le temps de prise initial et final du béton* **[100]**.

En outre, dans les pratiques de construction en béton, l'importance du temps de prise et de l'ouvrabilité est due à la nécessité de planifier les différentes phases des opérations de construction, notamment le transport, la mise en place du béton et la finition. Le moment du décoffrage est également influencé par le temps de prise du béton. L'ajout de PC a une

influence significative sur la prise de la pâte et du mortier de ciment, ainsi que sur celle du béton.

Olivia et Oktaviani **[91]** montrent que les temps de prise initiale et finale augmentent avec l'augmentation du pourcentage de remplacement des cendres de coquillages. Il est connu que la proportion de CaO (composition principale des coquillages), due à l'effet de dilution des coquillages dans la matrice cimentaire, peut retarder les temps de prise initial et final. L'augmentation de la quantité d'eau nécessaire au mélange, ainsi que le retard initial d'hydratation causé par la présence de plus de fines dans le mélange par rapport à l'utilisation du ciment seul, pourraient entraîner l'allongement du temps de prise.

Nor Hazurina et al. **[107]** ont noté que l'ajout de cendres de coquilles de coques retardaient le temps de prise du ciment. Cendres de coquilles de coques retardait le temps de prise du ciment. En outre, la valeur d'affaissement du béton diminue proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de substitution des cendres de coquilles.

Lertwattanaruk et al. **[96]** ont effectué des essais de prise sur des mortiers contenant de la poudre de coquilles calcinée, conformément à la norme ASTM C807. Leurs résultats ont montré qu'en augmentant le taux de remplacement de la poudre de coquilles (5 %, 10 %, 15 % et 20 %) dans le ciment pour la préparation des mortiers, cela a entraîné une augmentation du temps de début et de fin de prise par rapport aux mortiers de référence. Cette observation a été attribuée à la diminution de la quantité de ciment, ce qui perturbe la réaction d'hydratation.

D'autre part, une étude menée par Othman et al. **[89]** a révélé que l'ajout de poudre de coquilles de coque calcinée a diminué le temps de prise du ciment.

Cependant, selon une étude menée par Olivia et al. **[91]**, les temps de fin de prise des bétons contenant 4 % de poudres de coquilles de coque et de palourde calcinées dans le ciment étaient plus courts que ceux des bétons ordinaires. Les chercheurs ont conclu que l'incorporation de ces poudres dans le béton avait augmenté la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment en raison de la teneur élevée en chaux vive. La figure I.32 illustre les résultats obtenus.

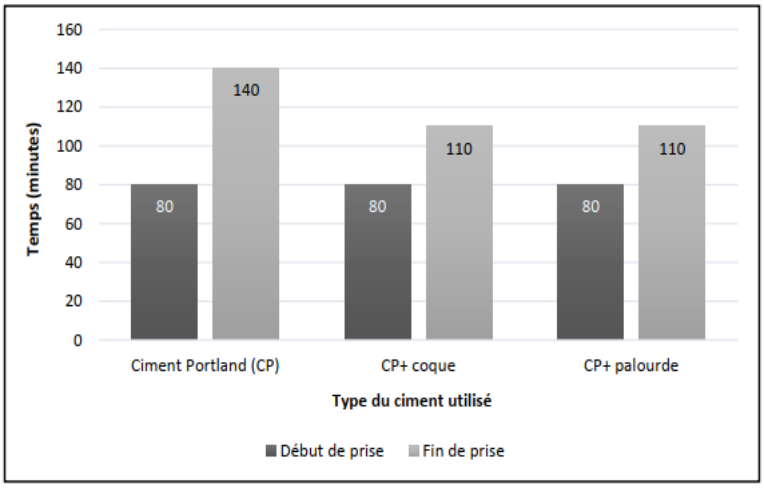


***Figure I.32**: Effet de la PC sur le temps de prise initial et final du béton contenant 4% de poudre de coquilles dans le ciment* **[91]**.

Maglad et al. **[105]** ont étudié l'effet de l'utilisation de 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de cendres de coquillages comme remplacement du ciment sur les propriétés du béton mousse léger. Les résultats ont montré une augmentation des temps de prise initiale et finale, ainsi qu'une diminution de l'étalement du béton frais.

I.3.8. Effet de la poudre de coquillages sur l'état durci du béton

I.3.8.1. Résistance à la compression

Plusieurs chercheurs affirment que la PC et la fumée de silice contribuent au développement des performances du béton, mais la PC est relativement moins chère que la fumée de silice et peut-être utilisée plus fréquemment dans le béton pour améliorer ses caractéristiques mécaniques. Cette amélioration s'explique par de nombreux auteurs par le fait que l'activité pouzzolanique est dominante, alors que d'autres auteurs favorisent la dominance de l'effet physique. La substitution partielle du ciment par la PC 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 la PC. Pour l'obtention des résistances maximales du béton/mortier/pâte. Il a été rapporté que le taux optimal dépend du type de ciment, du taux de substitution et du dosage des adjuvants. Certains auteurs croyaient que le rapport E/C est le principal facteur qui régit la teneur optimale de la PC 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 la PC. En effet, il existe de nombreuses théories et de nombreux résultats expérimentaux dans la littérature sur l'effet de la teneur optimale de la PC **[108, 109]**.

Lertwattanaruk et al. **[96]** ont inclus trois types de poudres de coquilles (palourde, coque et huître) dans le ciment pour formuler des mortiers, en variant le taux de remplacement (5%, 10 %, 15 % et 20 %). La variation de la résistance à la compression a été mesurée à plusieurs intervalles (1, 3, 7, 28 et 60 jours). Les résultats obtenus ont révélé que l'incorporation de la poudre de coquilles entraînait une diminution de la résistance des mortiers par rapport aux mortiers de référence, et que les mélanges contenant la poudre de coquilles de palourde présentaient les performances les plus élevées. La figure I.33 illustre les résultats concernant la résistance des mortiers contenant la poudre de palourde en tant que substitut partiel du ciment.

Il est observé qu'il y a eu une diminution de la résistance à 7 jours de 5 % et 14 %, respectivement pour des taux de remplacement de 5 et 10 %. De plus, la diminution des résistances à 28 jours était respectivement de 17 % et 23 %. Cette baisse pourrait s'expliquer par l'absence de réactivité chimique entre les poudres de coquilles et le ciment Portland. Cependant, les petites particules de coquilles broyées, plus petites que les particules de ciment, pourraient agir comme un matériau de remplissage, comblant les vides. Les résistances à la compression des mortiers contenant des coquilles étaient inférieures à celles du mortier de référence.

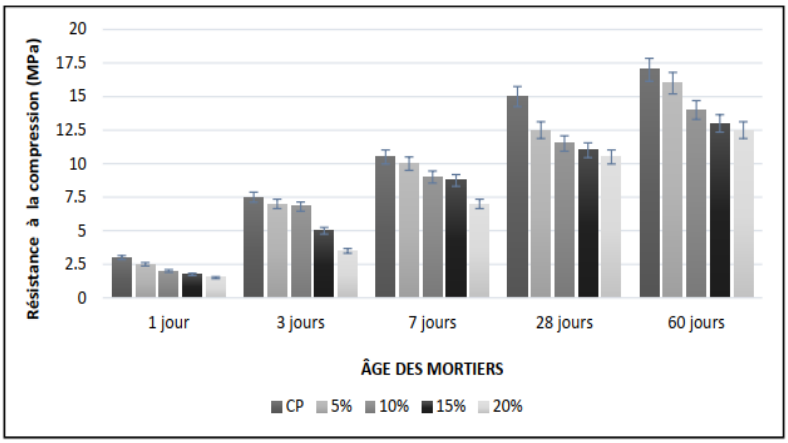


***Figure I.33**: Variation de la résistance à la compression des mortiers à base de la poudre de coquillage (palourde)* **[96]**.

Sandjaya et al. **[110]** ont également effectué le recyclage des coquilles de palourde (Anadara Granosa) provenant de la côte ouest de la Malaisie péninsulaire. Ces coquilles ont été nettoyées, séchées et broyées jusqu'à l'obtention d'une poudre (voir la figure I.34). Contrairement aux poudres de coquilles précédemment étudiées, celle-ci n'a pas été calcinée afin de réduire au minimum les émissions de CO_2. Elle a été utilisée pour remplacer partiellement le ciment dans des mortiers, avec des taux de remplacement de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.

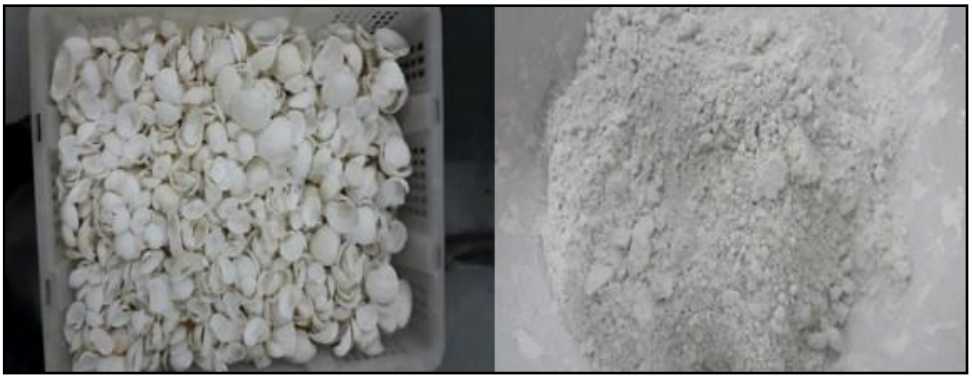


Figure I.34*: Coquilles de palourde broyées (Anadara Granosa)* **[110]**.

Sandjaya et al. **[110]** ont observé que l'incorporation de la poudre a entraîné une diminution de la résistance. En effet, celle-ci a diminué respectivement de 34 %, 41 %, 46 %, et 53 % à 7 jours par rapport aux mortiers témoins. De plus, la réduction de la résistance à 28 jours était respectivement de 23 %, 29 %, 33 % et 35 %.

Une étude menée par P. Adewuyi et al. **[111]** a valorisé les coquilles de bigorneau et d'escargot provenant du Nigeria en les incorporant dans le ciment pour la fabrication de béton. La résistance à la compression a été mesurée à 28 jours. Les chercheurs ont observé une augmentation de la résistance de 8,5 % et 3 % pour les bétons contenant les coquilles par rapport au béton de référence.

Tayeh et al. **[98]** ont étudié l'effet de l'utilisation de la poudre de coquillage comme substitut du ciment à des niveaux de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Les résultats montrent que l'ajout de 5 % de poudre de coquillage au béton améliore la résistance à la compression .

Seo et al. **[112]** ont examiné l'impact de l'ajout de 3 %, 6 %, 9 % et 12 % de poudre de coquille d'huître en tant que substitut pondéral du ciment dans la composition du mortier. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la compression du mortier avec l'ajout de 3 % de poudre de coquille d'huître.

Abdelouahed et al. **[85]** ont étudié l'utilisation de la poudre de coquillages (SSP) comme substitut du ciment dans des proportions de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Les résultats indiquent que le remplacement de 5 % du ciment par des coquillages a entraîné une augmentation de la résistance mécanique à la compression du mortier à un jeune âge et que le mortier à base de 10 % de SSP a montré la plus forte résistance.

Rollakanti et al. **[113]** ont utilisé 10, 20 et 30 % de poudre de coquillage à la place du ciment et ont constaté que la résistance à la compression restait constante à 10 % et diminuait ensuite à mesure que la proportion de poudre de coquillage augmentait.

Sangeetha et al. **[114]** ont étudié l'utilisation potentielle de 5 %, 10 % et 15 % de poudre de coquillages comme substituts de ciment pour produire un béton respectueux de l'environnement. Ils ont constaté une amélioration de 30 % de la résistance à la compression à 90 jours, et le taux de remplacement optimal est de 5 %.

I.3.8.2. Résistance à la traction par flexion

Différents auteurs **[89, 91]** ont déterminé la résistance à la traction pour évaluer l'effet de l'incorporation de poudres de coquillages dans le béton. Le tableau I.4 présente les résistances à la traction des bétons incorporant la poudre de coquilles de coque et de palourde dans le ciment. On observe une augmentation de la résistance avec le temps. Effectivement, il est notable que la résistance a augmenté avec le temps.

Tableau I.4 *:Variation de la résistance à la traction des déférent bétons* **[89, 91]**.

Types de coquillages	**Taux de remplacement optimal (%)**	**Résistance des échantillons témoins (MPa)**			**Résistance à la traction (MPa)**		
		7 jours	**28 jours**	**90 jours**	**7 jours**	**28 jours**	**90 jours**
Coque	4	4.5	5.5	6.1	4.6	6.1	6.7
Palourde	4	2.7	3.3	3.6	2.5	3.6	3.3

De plus, Othman et al. **[89]** ont observé une augmentation de la résistance à la traction du béton à base de 4% de poudre de coque, de l'ordre de 2 %, 11 % et 10 % respectivement à 7, 28 et 90 jours de durcissement , en comparaison à celle du béton de contrôle. En outre, Olivia

et al. **[91]** ont rapporté que la résistance à la traction du béton fabriqué avec 4 % de la poudre de palourde a réduit respectivement de l'ordre 7 % et 8 % à 7 et 90 jours, en comparaison à celle du béton témoin, comme montré dans la figure I.35.

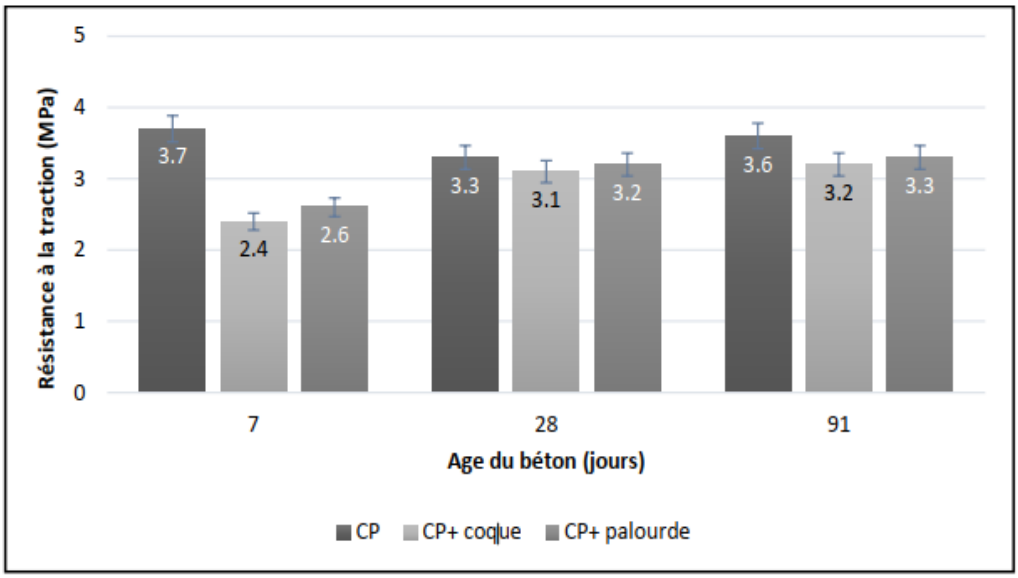


***Figure I.35**: Variation de la résistance à la traction du béton ordinaire à base de la poudre de coquillage (palourde)* **[91]**.

Plusieurs études antérieures ont fait état d'une amélioration des caractéristiques de flexion et de traction du béton grâce à l'inclusion de coquillages dans le mélange de béton. L'amélioration des caractéristiques de traction et de flexion est principalement attribuée à la teneur élevée en calcium des coquillages, qui améliore la liaison à l'interface de la pâte de ciment **[89, 90]**. Des recherches antérieures ont montré que l'ajout de 5 % de cendres de coques au mélange de béton améliorait de manière significative la résistance à la traction **[115]**. Selon la recherche, il a été découvert que la résistance à la traction de la combinaison coque- ciment portland et de la combinaison palourde-ciment portland en comparaison avec le béton du ciment portland (contrôle) était significativement plus faible **[91]**. Une autre étude a également montré que le remplacement de 5 % par des cendres d'escargot augmentait de 3,54 % la résistance à la traction par rapport à l'échantillon de contrôle **[93]**.

Abinaya, s. et al. **[116]** rapportent que la résistance à la flexion après 28 jours pour le béton de coquilles d'huîtres est enregistrée entre 5,84 et 8,92 N/mm^2 pour des remplacements de 0 à 10 %. Le rapport minimum entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression pour le béton témoin était de 15,37 %, tandis que le rapport maximum entre la

résistance à la flexion et la résistance à la compression pour un remplacement de 7,50 % était de 22,30 %.

En outre, la figure I.36 présente le résumé de plusieurs des études **[89-91, 93, 115]** sur les résultats de la résistance à la flexion en comparaison avec les mélanges de contrôle.

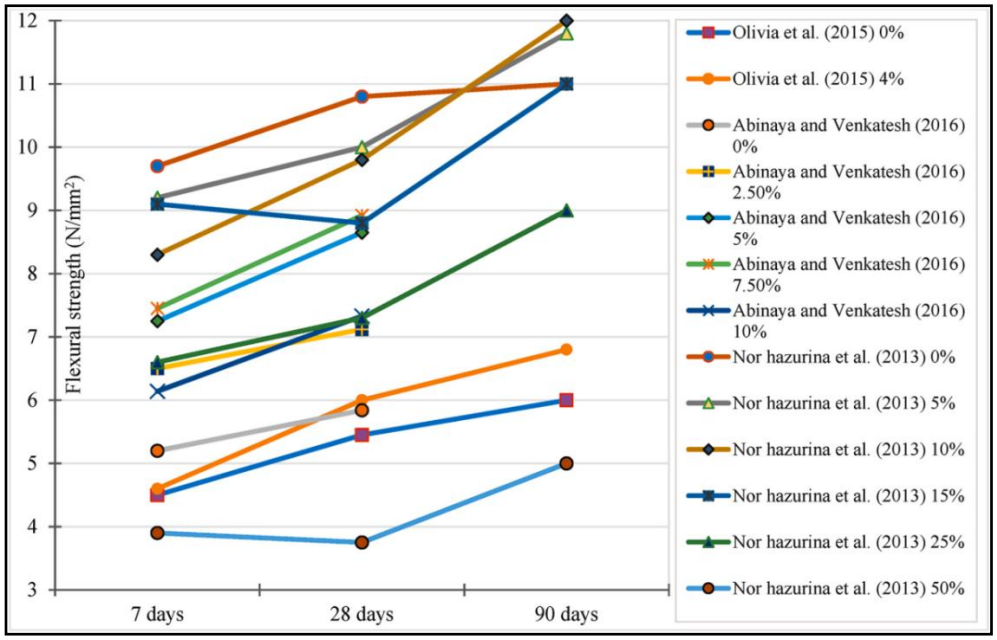


Figure I.36**: Résumé des résultats de la résistance à la flexion en comparaison avec les mélanges de contrôle[117]**.

I.3.8.3. Densité

Olivia et al. **[91]** ont comparé les masses volumiques des bétons contenant 4% de poudre de coquilles de palourde calcinée dans le ciment avec celles des bétons ordinaires. Les résultats sont illustrés dans la figure I.37. En premier lieu, il a été observé que la masse volumique du béton augmente avec son âge. De plus, la masse volumique du béton contenant la poudre de palourde était la plus élevée. Cette augmentation pourrait être attribuée à la teneur élevée en CaO et à l'effet de remplissage de la poudre de palourde calcinée, qui permet de réduire la porosité.

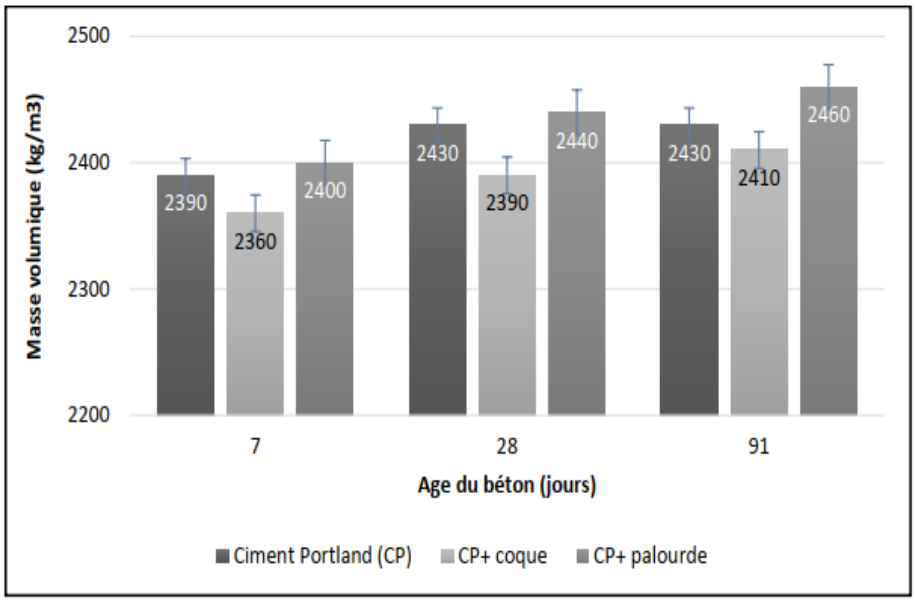


Figure I.37**: Variation de la masse volumique du béton ordinaire et du béton aux poudre de coquilles[91]**.

Norhazurina et al. **[89]** ont étudié la variation de la densité du béton avec différentes cendres de coquilles de palourdes et du béton de référence est présentée dans la figure I.38. Il a également été rapporté que la cendre de coquille de palourde à 6% de remplacement avait la densité la plus élevée des remplacements partiels de ciment.

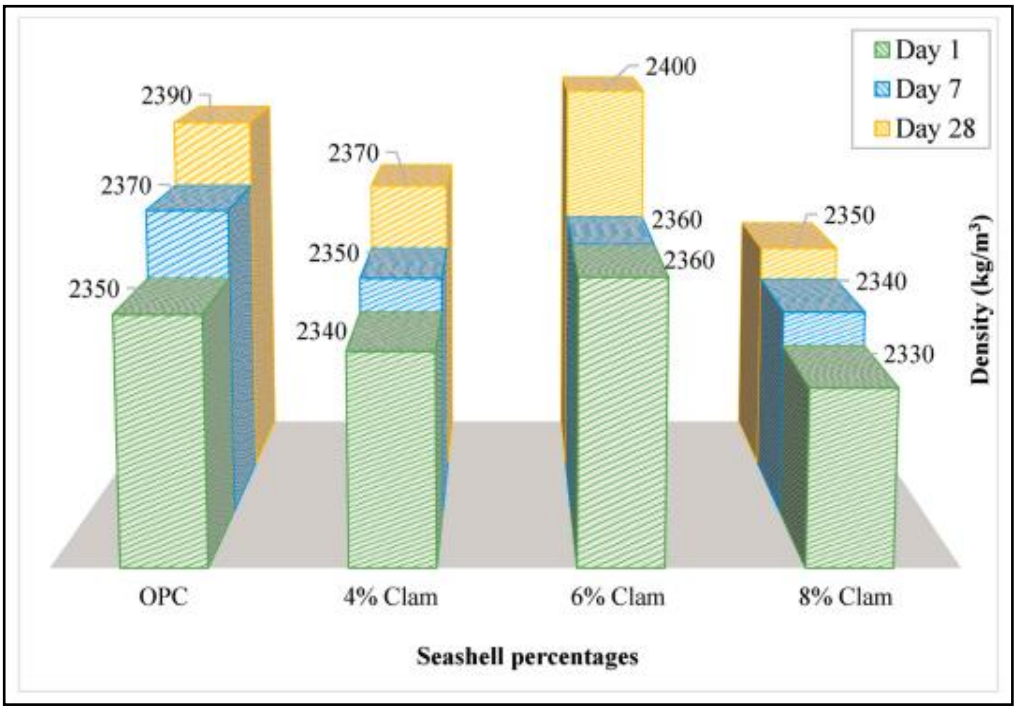


Figure I.38**: Variation de la densité du béton de cendres de coquilles de palourde[89]**.

I.3.8.4. Module d'élasticité

Olivia et al. **[91]** ont mesuré le module d'élasticité du béton ordinaire et du béton contenant 4% de poudre de coque . D'après les résultats obtenus, Olivia et al ont observé que le module d'élasticité du béton avec 4% en poudre de coquilles était légèrement inférieur à celui du béton ordinaire. Cependant, une réduction de l'ordre de 16 %, 8 % et 6 % à l'âge de 7, 28 et 90 jours respectivement, a été observée. Ces résultats obtenus montrent une progression plus lente des résistances du béton avec la poudre de coque. Cette progression est probablement due à la présence de pourcentage élevé en CaO.

Tayeh et al. **[104]** ont constaté que le module d'élasticité du béton de poudre de coquillage était inférieur au module d'élasticité du ciment Portland ordinaire, bien que le taux d'augmentation du module d'élasticité pour le béton de poudre de coquillage soit supérieur à celui de la norme. Aux premiers âges de durcissement, la valeur plus faible du module d'élasticité du béton de coquillage montre un développement précoce de la résistance. Cela peut être attribué à la teneur élevée en CaO des coquillages **[90]**.

I.3.8.5. Influence de la poudre de coquillage sur la durabilité des bétons

La durabilité peut être définie comme la capacité du béton à résister aux agressions chimiques ou physiques, tout en maintenant ses performances et son comportement dans les conditions de service prévues pour l'ouvrage. Elle dépend de plusieurs paramètres tels que l'humidité, la température et l'agressivité chimique et mécanique des milieux environnants.

a) Porosité

Ez-zakia et al. **[118]** combinant des coquilles d'huîtres et des sédiments marins pour remplacer le ciment à 8, 16 dans des mortiers. Le résultat obtenu a enregistré une augmentation de la porosité apparente des mortiers de l'ordre de 33% par rapport au mortier de référence (Témoin). Cependant, le mortier témoin présentait une porosité apparente de 17,4 %, tandis que le remplacement du ciment à 33 % permettait d'obtenir une porosité apparente accrue de 19,4 %.

D'autre part, une étude examiné par Nor Hazurina et al. **[89]** a rapporté une réduction de la porosité du béton avec l'utilisation de coquilles de coques broyées comme substituts du ciment jusqu'à 15%.

Gengying et al. **[119]** ont comparé des mortiers à base de cendres volantes et de chaux modifiés par des coquilles d'huîtres a observé que la combinaison de coquilles d'huîtres broyées et de chaux réduisait la porosité du mortier. Le pourcentage de pores inférieur à 50 nm a augmenté, la présence de coquilles d'huîtres broyées a favorisé la réaction pouzzolanique des cendres volantes dans le mortier. La figure I.39 montre la porosité et l'absorption d'eau de mélanges de béton contenant différents types de coquillages à partir de nombreuses études.

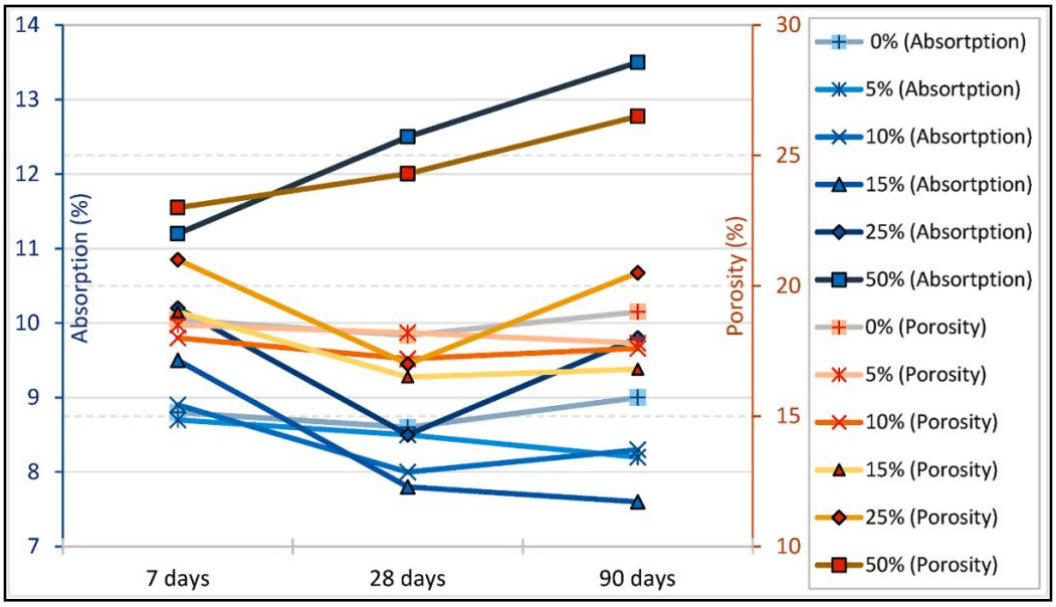


Figure I.39**: Variation de la porosité et a d'eau et des mélanges de béton à partir de nombreuses études[117]**.

b) Absorption d'eau

Des recherches antérieures par Nor Hazurina et al. **[89]** et Tayeh et al. **[104]** ont montré que l'absorption d'eau du béton augmente avec la teneur en coquillages en raison de la nature poreuse de ces derniers. Cependant, les coquillages présentent un potentiel de durabilité plus élevé. L'absorption du béton formé avec des cendres de coquillages brûlés en remplacement partiel du ciment est rarement prise en compte et documentée. Les résultats des tests d'absorption sur le béton fabriqué avec plusieurs cendres de coquilles de coques/compléments de ciment ont été comparés à des mélanges standards et sont présentés dans la figure I.40.

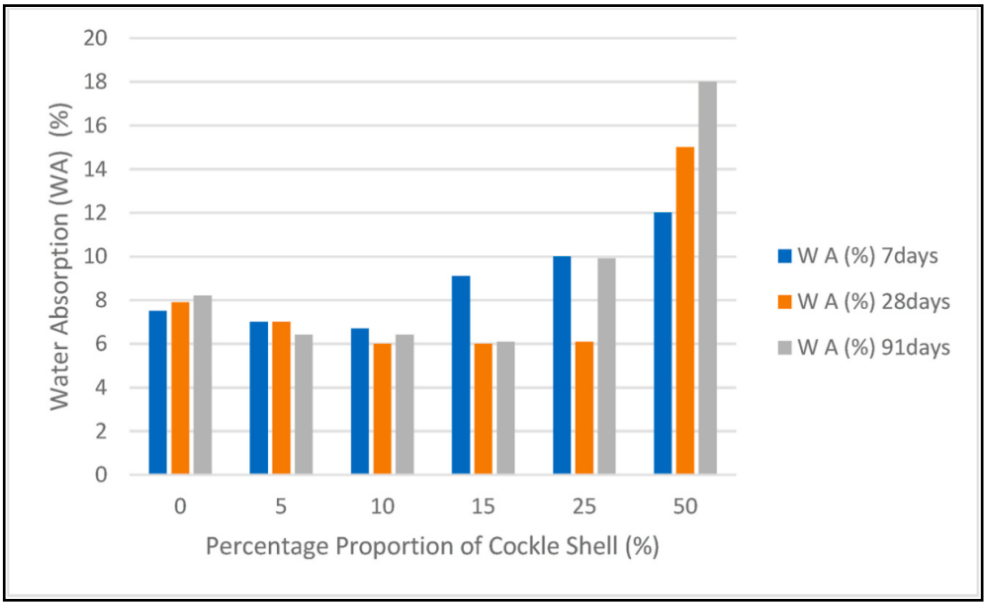


***Figure I.40**: Résultats du test d'absorption*[89, 104].

Il est visiblement démontré que les cendres de coquillages de coque minimisent l'absorption du béton à des pourcentages de remplacement faibles de 5 %, 10 % et 15 %. Les résultats de l'absorption peuvent être associés à l'inclinaison de l'aragonite amorphe de la poudre de coquillage. Les particules de cendres s'assemblent les unes aux autres et enferment les espaces de la matrice du béton. De ce fait, l'absorption est minimisée. Il est à noter que l'absorption est plus élevée à des niveaux de remplacement plus élevés en raison de la formation de vides résultant de la forme d'aragonite des cendres de coquillages.

c) Résistance à la pénétration aux ions chlorure

Ez-zakia et al. **[118]** ont remplacé du ciment par des coquilles d'huîtres broyées. Cela a permis d'améliorer la résistance du mortier à la pénétration des chlorures, ce qui a été attribué à l'effet de remplissage offert par la poudre de coquille en affinant les pores. Néanmoins, les bétons produits avec des coquilles Saint-Jacques ont donné des coefficients de diffusion du chlorure plus élevés. Ils ont donc été classés comme très poreux aux ions chlorure (figure I.41).

En outre, Cuadrado-Rica et al. **[120]** rapportent que l'augmentation des pourcentages de coquilles d'huîtres broyées (>33 %) dans le remplacement du ciment s'est avérée conduire à une pénétration accrue du CO_2 dans les mortiers de ciment, d'où un risque accru de carbonatation.

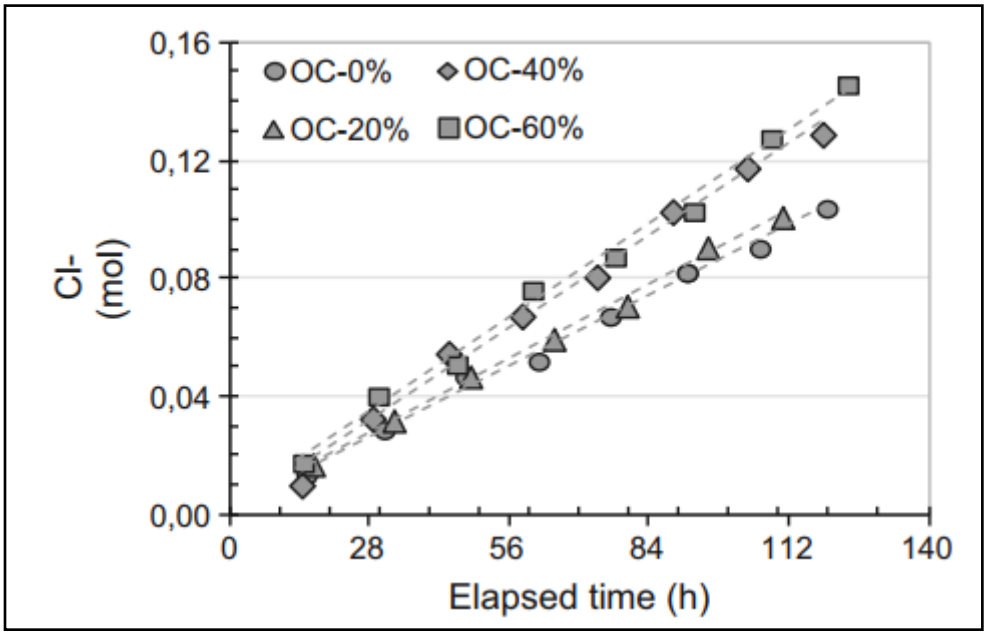


***Figure I.41**: Pénétration des ions chlorures* **[120]**.

d) Attaque chimique (sulfates et alcalins)

Selon Bamigboye et al. **[117]**, les coquillages étant obtenus à partir d'eau de mer ou d'environnements simulés similaires, ils ont le potentiel d'améliorer la durabilité dans des conditions d'eau salée, par rapport au béton conventionnel. La résistance du béton produit avec des coquillages remplaçant partiellement les ciments à de telles attaques a été étudiée en utilisant une solution de NaOH à 5 % (alcali) et de MgSO4 à 5 % (sulfate). La résistance du béton produit avec des coquillages remplaçant partiellement les ciments à de telles attaques a été étudiée en utilisant une solution de NaOH à 5 % (alcali) et de MgSO4 à 5 % (sulfate). Les résultats révèlent que le pourcentage de perte de poids et de résistance à la compression due aux attaques sulfatées et alcalines est le plus faible avec les niveaux d'addition de coquillages de 0 % et 5 %. Ils indiquent en outre que les sulfates alcalins entraînent une diminution de la résistance à la compression après 90 jours pour tous les lots mélangés.

I.4. VALORISATION DE DECHETS DE GRANITE COMME MATERIAUX GRANULAIRES DANS L'INDUSTRIE DU BETON

Les granulats constituent les éléments fondamentaux de tous les travaux de béton en Génie civil. Ainsi, il est crucial de comprendre pleinement leurs propriétés et leurs impacts, à la fois lors de leur fabrication et de leur utilisation. Cela permet de répondre efficacement à une demande croissante tout en respectant les normes de qualité requises **[121]**. L'Algérie dispose d'importantes ressources naturelles propices au développement de l'industrie des matériaux de construction. Sur son territoire, on recense 1146 exploitations minières actives réparties dans les 48 wilayas, dont 906 sont des exploitations privées et 240 sont des exploitations publiques (DGM, 2010). Cette augmentation du nombre d'exploitations privées fait suite aux mesures incitatives visant à encourager l'investissement dans ce secteur. Cependant, cette expansion industrielle engendre des préoccupations croissantes en matière de pollution **[122]**.

L'industrie de la construction consomme une quantité considérable des granulats, estimée à environ 165 millions de tonnes par an, dont 60 millions de tonnes de sable. Cette demande annuelle devrait doubler progressivement, en raison du développement notable des secteurs des travaux publics (comme l'autoroute Est-Ouest, l'entretien, la consolidation et l'extension du réseau routier, ainsi que le réseau ferroviaire) et du bâtiment (notamment avec le programme d'un million de logements) au cours des dernières années **[123]**. Entre 2005 et 2009, la demande totale en granulats est estimée à 660 millions de tonnes. Jusqu'aux années 1980, l'approvisionnement en ces matériaux, en particulier le sable, largement utilisé dans la fabrication de bétons et de mortiers, ne posait pas de problèmes majeurs. Cependant, à partir des années 1990, la demande croissante et constante ainsi que l'absence de crues ont conduit à un rapide épuisement des ressources en sablières et ballastières. Cette situation, survenue en peu de temps, a soulevé des préoccupations quant à la disponibilité du sable. En réponse, l'exploitation non réglementée des sables marins a entraîné de graves dommages environnementaux **[124]**.

À partir de 1999, l'extraction de sable sur les plages a été interdite. En parallèle, les carrières de granulats, principalement calcaires, produisent du sable résultant des opérations de concassage. Ces sables étaient destinés au secteur des travaux publics et non à la fabrication de béton. Cependant, la limitation du taux de fines (éléments passant à 80 µm)

dans les sables destinés aux bétons hydrauliques pénalisait fortement les sables calcaires. Il était donc difficile de concilier cette limitation avec le module de finesse. Le seuil de taux de fines des sables était fixé par les normes françaises utilisées en Algérie à 12 % **[125]**.

Le concept de ce chapitre, est de valoriser les matériaux granulaires des déchets industriels, en particulier les sables de déchets de granite recyclés dans l'emploi des travaux de génie civil. L'objectif est aussi de substituer le sable naturel de la wilaya d'Oud Souf par le sable de déchets de granite (SG) pour limiter l'extraction sauvage et illicite des sables naturels, et même de contribuer à la sauvegarde de l'environnement **[121]**.

I.4.1. Production des granulats

I.4.1.1. Production des granulats dans le monde

Les granulats sont le matériau le plus largement utilisé à l'échelle mondiale, représentant au moins 80 % du volume des structures en béton. Leur importance dans l'aménagement du cadre de vie ainsi que dans le développement économique et culturel est incontestable (figure I.42) **[126]**.

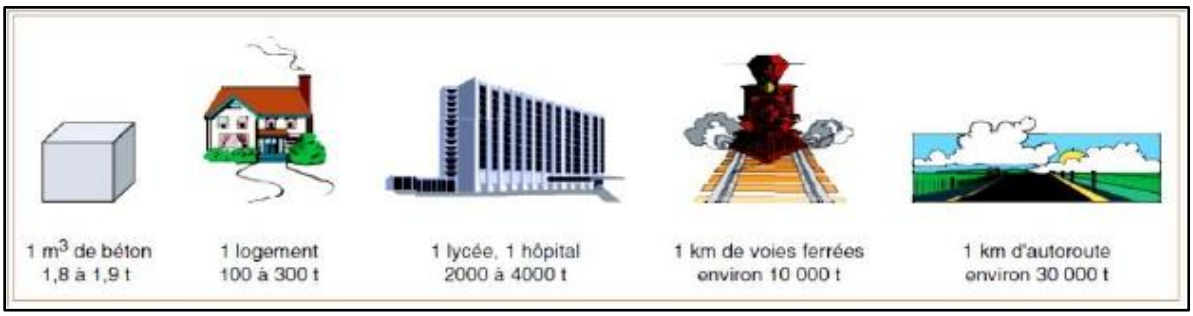


Figure I.42**: Consommation de granulats pour quelques ouvrages types[126]**.

Les pays membres de l'OCDE consomment en moyenne entre cinq et huit tonnes de granulats par personne et par an. En revanche, dans les pays en développement ou en transition, cette consommation se situe plutôt entre une et deux tonnes par personne et par an. Ces chiffres mettent en lumière les besoins en granulats qui demeurent à combler pour répondre aux demandes en équipements, infrastructures et bâtiments dans certains pays**[126]**.

En 2008, la demande mondiale de granulats était estimée à près de 24,9 milliards de tonnes (figure I.43), et en 2013, elle était proche de 28,7 milliards de tonnes, ce qui place les

granulats comme la ressource la plus consommée après l'eau, selon les données de World Construction Aggregates (2009) **[126, 127]**.

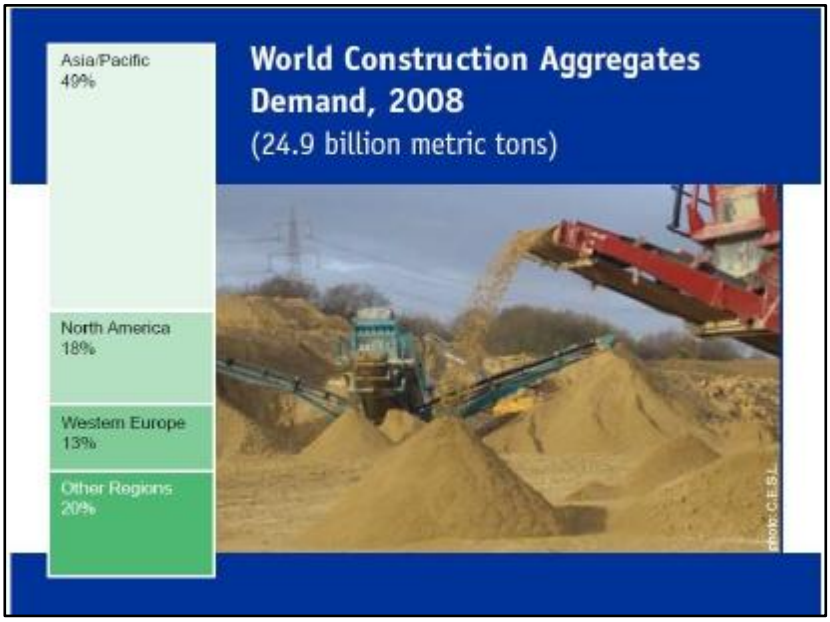


Figure I.43**: Production mondiale des granulats en 2008[126, 127]**.

Jusqu'à présent, la recherche sur des ressources pour répondre à la demande croissante en granulats et leur exploitation sans nuire à l'environnement posent des défis croissants, particulièrement dans les régions fortement impliquées dans le secteur de la construction. La problématique des granulats est influencée par des considérations socio-économiques, organisationnelles, techniques, environnementales, juridiques et fiscales, ce qui en fait une question politique nécessitant la mise en place d'une stratégie adaptée. Cette stratégie doit être alignée sur les principes du développement durable et inclure la recherche et la validation des solutions alternatives les plus appropriées **[128]**.

I.4.1.2.Production des granulats en Algérie [129]

Depuis l'année 2000, la production nationale d'agrégats a connu une augmentation constante. Elle a été multipliée par plus de 13, passant de 4,14 millions de mètres cubes en 2000 à 55,3 millions de mètres cubes en 2009, comme illustré dans la figure I.44.

En 2009, huit wilayas situées toutes au Nord du pays (Bordj Bou Arreridj, Sétif, Mascara, Boumerdès, Constantine, Mila, Sidi Bel Abbés et Ain Defla) ont chacune atteint un niveau de production supérieur à 3 millions de mètres cubes, totalisant ainsi une production de

30,6 millions de mètres cubes, ce qui équivaut à plus de la moitié (55,3%) de la production nationale, comme le montre la figure I.45.

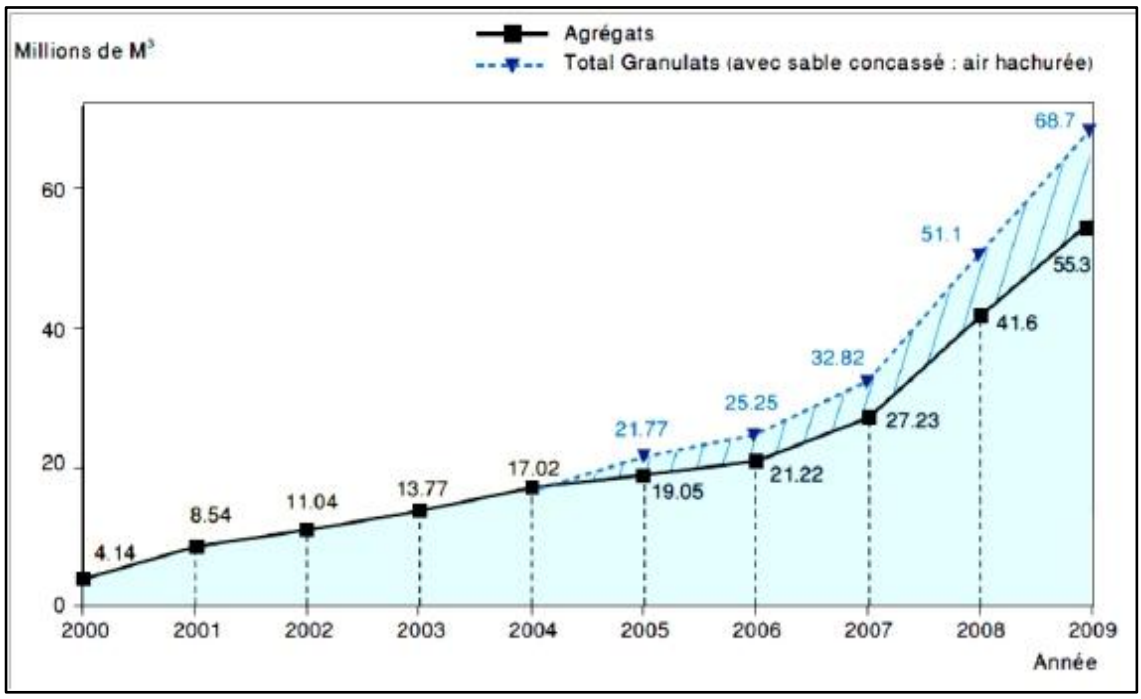


Figure I.44 *Evolution de la production des agrégats période 2000–2009***[129]**.

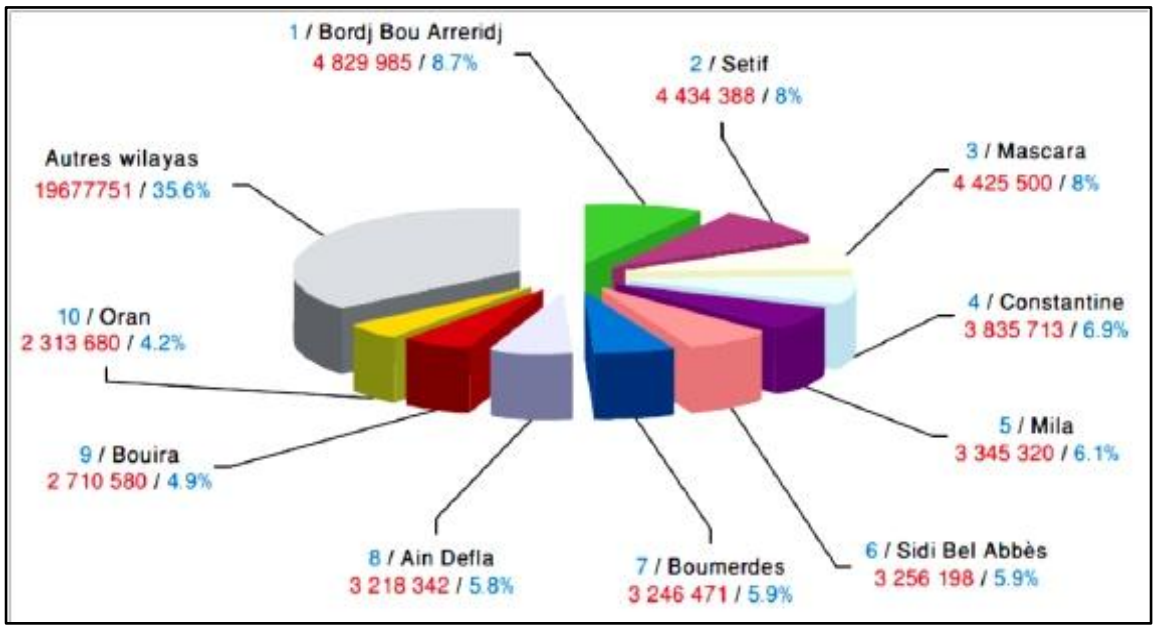


Figure I.45 *: Production des agrégats (M^3) : année 2009, 10 wilayas les plus productrices***[129]**.

I.4.2.Contexte environnemental des matériaux granulaires

Avec la prise de conscience de la menace liée aux émissions de gaz à effet de serre dans les années 90, le développement de matériaux à faibles émissions de CO_2 durant leur synthèse est aujourd'hui un enjeu écologique et économique crucial afin de fournir une alternative aux matériaux conventionnels. Au-delà de la qualité des matériaux de construction utilisés, un autre enjeu de la construction durable est lié à la maîtrise des consommations des ressources naturelles intrinsèques à l'utilisation de la construction sous sa forme d'habitat. Ces besoins de consommations des ressources naturelles sont très grands. Il est donc fondamental, lors du développement de matériaux, de prendre en considération le caractère écologique des matières premières, la consommation d'énergie liée à la mise en œuvre et la capacité du matériau à rendre l'habitat confortable du fait de ses propriétés d'usage (résistance thermique, propriétés hygrothermiques, etc.). Dans ce contexte, le développement d'éco-matériaux granulaires est une voie en plein essor **[125]**.

La construction de bâtiments, d'infrastructures et d'ouvrages d'art nécessite d'importants approvisionnements en matériaux. Jusqu'à présent, les sables les plus largement utilisés pour la fabrication des bétons utilisés dans ces ouvrages sont les sables roulés alluvionnaires. Cependant, les prélèvements excessifs de ces sables ont grandement contribué à l'épuisement des ressources et ont entraîné des conséquences néfastes pour l'environnement, comme illustré dans la Figure I.46 **[130]**.

De nombreuses régions du monde sont confrontées à cette situation et doivent désormais rechercher des matériaux de substitution pour répondre à la demande croissante en granulats pour béton. Les sables de concassage sont souvent la seule alternative viable. Cependant, ils doivent respecter les critères de qualité spécifiques à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes et à des prix raisonnables. Malgré cela, les sables provenant des carrières sont souvent perçus par les utilisateurs comme des «déchets» en raison de leur forte teneur en fines, parfois argileuses. Par conséquent, ils sont souvent écartés pour une utilisation dans le béton, même si les spécifications d'utilisation le permettent dans de nombreux cas **[130]**.



Figure I.46*: Les impacts de l'extraction du sable sur l'environnement***[129]**.

I.4.3 .Généralités sur les matériaux granulaires

I.4.3.1. Définitions

Un matériau granulaire est un système composé d'un grand nombre des particules macroscopiques. Selon Degouet.C **[125]**, les particules constituant les matériaux granulaires doivent avoir une dimension caractéristique supérieure à 1 µm. La classification proposée par Brown & Richards **[131]** est la suivante : un matériau granulaire est formé de composants solides discrets qui restent principalement en contact. Cette définition exclut les lits fluidisés, les suspensions et autres milieux peu concentrés en matériaux granulaires. Le contenu solide fractionnaire d'un milieu granulaire est défini comme le rapport entre la densité volumique des composants élémentaires et la densité volumique réelle du matériau. Cette définition, bien que générale, peut être subdivisée en plusieurs catégories **[130]** :

- ✓ ***Une poudre :*** est un type de matériau granulaire composé de particules dont les tailles sont inférieures à 100 µm. On distingue généralement les poudres granulaires, dont la taille se situe entre 10 et 100 µm, et les poudres superfines, dont la taille se situe entre 1 et 10 µm.
- ✓ ***Un solide granulaire :*** est un matériau composé de granulés dont la taille se situe généralement entre 100 et 3000 µm.
- ✓ ***Un solide brisé* :** est un matériau granulaire caractérisé par des particules dont la plupart ont des tailles supérieures à 3 millimètres.

Les propriétés des matériaux granulaires dépendent de la nature des interactions entre les particules elles-mêmes ainsi que de celles-ci avec le fluide environnant. Toutefois, pour d'autres matériaux granulaires, le comportement est principalement influencé par les interactions entre particules. Lorsque le fluide interstitiel est de l'air, ces matériaux sont alors appelés matériaux granulaires secs **[125]**.

I.4.3.2.Importances des matériaux granulaires

Les matériaux granulaires revêtent une grande importance économique et scientifique. Ils représentent une composante essentielle de notre environnement, comprenant des éléments tels que les argiles, les sables, les graviers, etc., et constituent également les fondements de nombreux secteurs industriels, notamment les travaux publics, le bâtiment et diverses industries. En ce qui concerne le secteur de la construction et des travaux publics, la consommation de ces matériaux est détaillée dans le tableau I.5 **[132]** :

Tableau I.5*: Consommation des granulats par secteur* **[132]**.

Quantité (Tonne)	**Destination**
30 000-50 000	Un kilomètre d'autoroute (6 voies)
20 000-40 000	Un Hôpital ou Lycée
10 000	Un kilomètre voie ferrée
100-300	Une maison individuelle
50	Un Logement d'un immeuble
2	Un M^3 de béton

I.4.4.Origine des granulats

Un granulat est un matériau de construction composé de grains de tailles variées (voir figure I.47). Il peut être naturel, artificiel ou recyclé. Les granulats naturels ne subissent aucune transformation autre que mécanique (par exemple, ils peuvent être obtenus par concassage). Les granulats recyclés sont issus du traitement de matériaux inorganiques déjà utilisés dans la construction **[133, 134]**.



***Figure I.47** : Les agrégats (granulats : sable, gravier, etc.)* **[133]**.

I.4.4.1.Principales ressources des granulats

Les granulats peuvent être naturels, artificiels ou recyclés :

a) Granulats naturels

Les granulats naturels sont des grains minéraux qui proviennent de roches massives ou meubles (voir la figure I.48) et qui n'ont subi aucune transformation autre que mécanique **[133]**.



***Figure I.48**: Gisement de granulats naturel (sable d'Oued Souf)* **[133]**.

b) Granulats artificiels

Les granulats artificiels sont des grains minéraux qui sont le résultat d'un processus industriel impliquant des transformations thermiques, mécaniques ou d'autres types (voir la figure I.49)**[133]**.



Figure I.49** : Carrière de granulats artificiel[133]**.

c) Granulats recyclés

Les granulats recyclés sont obtenus par le traitement de matériaux inorganiques ayant déjà été utilisés dans la construction (voir la figure I.50)**[133]**.



***Figure I.50** :Matériaux recyclés* **[133]**.

I.4.5. Béton à base des granulats de déchets de granite recyclés

I.4.5.1. Le granite

Le granite est largement répandu sur la croûte terrestre, étant l'un des matériaux les plus communs. Il est couramment utilisé comme granulat dans la fabrication de béton, dans la construction de routes ou sous forme de blocs de construction. Au Burkina Faso, plus de 500 carrières de granit parsèment le pays, la majeure partie de la production étant destinée à être utilisée comme agrégat dans diverses constructions telles que des routes et des bâtiments **[135]**. Cependant, les carrières de granite et les industries de découpe génèrent d'importants déchets non biodégradables, engendrant ainsi d'importants problèmes environnementaux qui nécessitent une attention particulière en matière de recyclage **[136, 137]**.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur l'exploration de l'utilisation des déchets de granite en tant que complément cimentaire ou substitut au sable naturel dans la fabrication du béton **[137-139]**. Certaines études se sont penchées sur son utilisation dans la production de ciment, mais ont noté l'inertie chimique de la poussière de granite. Peu d'auteurs ont examiné spécifiquement son utilisation en tant que sable. Bien sûr, cette inertie constitue un obstacle à son utilisation en tant que matière première active, mais l'idée d'utiliser les déchets de granite comme un complément ou un substitut au sable dans la structure granulaire reste à explorer**[140]**.

I.4.5.2.Source de granite

Le granite est une roche magmatique plutonique (voir la figure I.51) présentant une texture grenue et une abondance en quartz, ainsi qu'une proportion plus élevée de feldspath alcalin que de plagioclase. Sa composition minéralogique se caractérise par la présence de quartz, de feldspaths potassiques (orthoses) et de plagioclases, ainsi que de micas tels que la biotite et la muscovite. En tant que composant majeur de la croûte continentale, le granite et les roches qui lui sont associées jouent un rôle crucial. Résistant et polyvalent, il est largement utilisé dans divers domaines tels que la construction, le dallage, la décoration et la sculpture, sous l'appellation commune de granite **[141]**.

Le granite se forme par le refroidissement lent en profondeur de vastes masses de magma intrusif, généralement sous forme de plutons. Au fil du temps, ces masses remontent et finissent par affleurer à la surface à la suite de l'érosion qui dégage les roches supérieures.

Ces magmas sont riches en silice et qualifiés d'acides, résultent principalement de la fusion partielle de la croûte continentale. Certains types de granites, appelés plagiogranites, se trouvent dans de petits plutons de la croûte océanique, formés par la différenciation ultime de magmas basiques. Les minéraux qui le composent incluent principalement du quartz, des micas (biotite ou muscovite), des feldspaths potassiques (orthoses) et des plagioclases. D'autres minéraux tels que la hornblende, la magnétite, le grenat, le zircon et l'apatite peuvent également être présents. Actuellement, on recense plus de 500 couleurs de granite différentes **[141]**.



Figure I.51*: Roche plutonique magmatique de granite (Kef Bouacida-Annaba, Algérie)***[141]**.

I.4.5.3.Propriétés de granite

a) Compositions chimiques de granite

Les propriétés chimiques du granite dans certaines études examinées présentées dans le tableau I.6. Comme le montre le tableau I.6, le granite est principalement composé de silice, d'alumine, d'alcalino-terreux (calcium, sodium et potassium), de fer, etc. Mais la composition chimique, qui est principalement contrôlée par des facteurs géologiques, varie d'une source à l'autre **[142]**.

Tableau I.6*:Compositions chimiques des granites utilisés dans plusieurs études***[142]**.

Chercheurs	Composition chimique (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2
Jeyaprabha et al.**[143]**	69.17	15.84	1.16	0.96	8.04	1.39	0.43	-
Ghannam et al.**[144**]	64.5	12.01	5.77	0.57	4.8	5.92	5.26	0.67
Abukersh et al.**[145]**	61.4	16.3	3.66	1.7	3.69	3.62	3.75	-
Allam et al.**[146]**	59.58	13.01	9.77	0.29	3.8	5.92	4.76	0.37
Bacarji et al.**[147]**	58.67	11.26	7.59	2.96	6.13	2.74	2.9	-
Ramos et al.**[148]**	63.22	15.66	4.47	1.82	3.26	2.68	5.02	-
Makani et al.**[149]**	61.11	14.36	5.48	2	1.83	2.23	5.89	-
Li et al.**[150]**	58.58	10.42	2.06	0.58	1.85	3.29	3.42	-

b) Couleur de granite

Le granite présentent une variété de couleurs (voir la figure I.52), allant du blanc laiteux à des teintes plus sombres, avec des intermédiaires colorés comme le rose prononcé. Les granites blancs sont souvent désignés sous le terme de *leuco granites*. Les granites roses sont également fréquents, particulièrement sur le littoral breton, ce qui a donné son nom à la côte de granite rose (Côtes d'Armor). De plus, la couleur d'un granite dépend des minéraux qui le composent. Par exemple, les granites roses doivent leur teinte aux impuretés présentes dans les feldspaths. En règle générale, la couleur du granite est principalement déterminée par l'orthose, étant donné que c'est le minéral le plus abondant dans sa composition**[141]**.

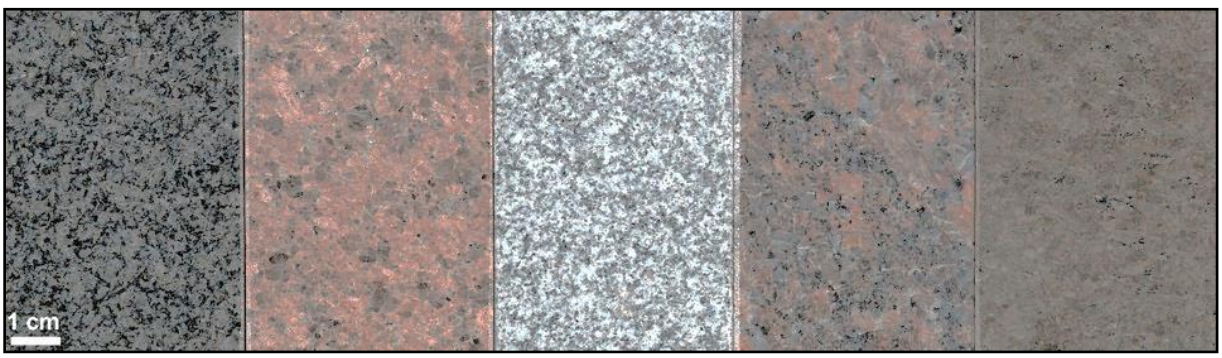


Figure I.52*: Exemples de granite de couleurs différentes* **[141]**.

c) Texture de granite

Généralement, le granite est constitué de grains, souvent de petite taille, qui sont généralement visibles à l'œil nu (voir la figure I.53). Chaque grain représente un minéral distinct, un cristal bien défini. Cette structure donne au granite une texture grenue. Les roches présentant une texture grenue sont principalement des roches magmatiques, parfois métamorphiques **[141]**.

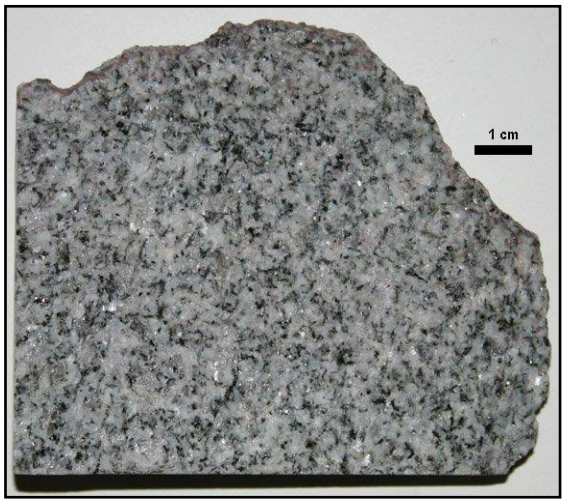


Figure I.53*: Texture de granite***[141]**.

En autre, il y a plusieurs sous-classes de textures grenues, comme présenté dans le tableau I.7 :

Tableau I.7*:Les déférents sous-classes de textures grenues de granite* **[141]**.

Texture	Description
Aplitique	Cristaux très fins, a peine visible a l'œil nu, voire invisible.
Pegmatique	Cristaux énormes, de grande taille, supérieure à la taille d'un grain de riz.
Porphyroide	Certaines portions de la roche sont aplitiques, alors que d'autres sont pegmatiques.

Certains granites sont qualifiés d'orbiculaires, ce qui signifie qu'ils sont composés de petites sphères riches en feldspaths et en micas (voir la figure I.54).

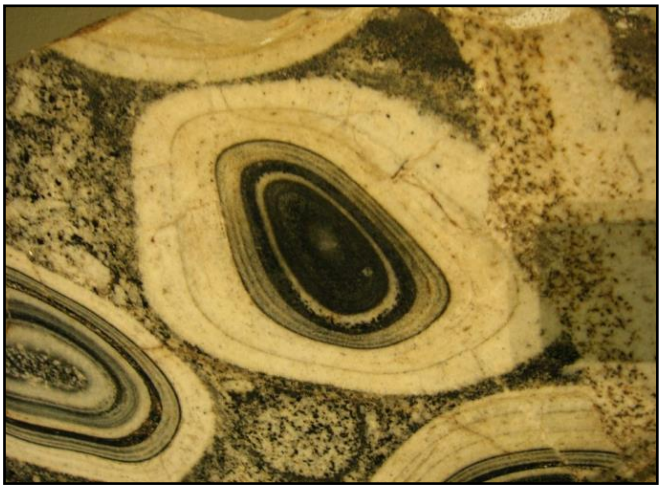


Figure I.54*: Le granite orbiculaires* **[141].**

I.4.5.4.Production mondiale de granite

Le marché de la pierre architecturale est soumis à des normes techniques et esthétiques strictes, telles que la porosité, la dureté ou la résistance. La vente de pierre brute ou transformée dépend largement d'un marché international compétitif, régulé par des réseaux de distribution bien établis et influencé par la demande pour des couleurs et des textures spécifiques en fonction des usages prévus **[141]**.

Le Brésil est devenu le principal fournisseur de granite des États-Unis, représentant 47 % des importations américaines. Il est suivi par la Chine (22 %), l'Inde (13 %) et l'Italie (11 %). Le Canada, quant à lui, ne représente que 2 % de ce marché, comme illustré dans la Figure I.55. De plus, en 2004, le Canada fournissait 11% du granite sur le marché américain, selon DENCO en 2005. Malgré sa proximité et la qualité de son granite, le Canada a perdu une part importante de ce marché. En effet, malgré la reprise économique aux États-Unis en 2014, cela ne s'est pas encore traduit par une reprise des exportations vers les États-Unis **[141]**.

Au cours de la dernière décennie, des changements dans les méthodes de construction des grands immeubles, notamment sur le plan architectural, ont entraîné une diminution de la demande pour la pierre architecturale**[141]**.

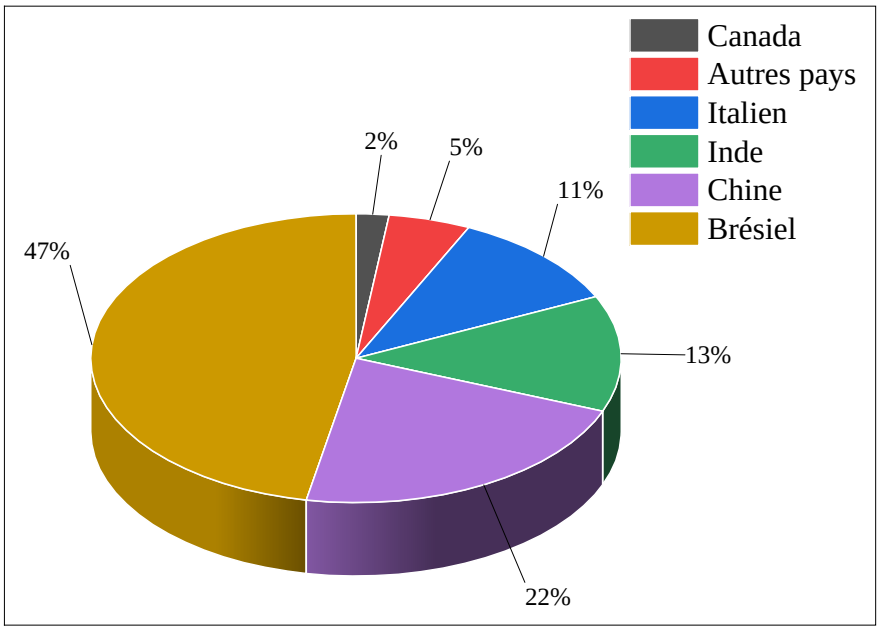


***Figure I.55**:Pourcentage par pays des importations de granite par les États-Unis en 2013* **[151]**.

I.4.5.5. Production de granite en l'Algérie

Selon Othman Hasnaoui, le directeur général de l'unité de production est spécifiquement Hasnaoui, axée sur l'approvisionnement des marchés internationaux. Nous ciblons les marchés européens, américains et du Moyen-Orient, où il existe une demande significative pour des carreaux de marbre d'une épaisseur d'un centimètre, de qualité et offrant une variété de couleurs, répondant aux normes internationales, a-t-il déclaré à Arab News **[152]**.

De plus, une capacité de production de 10 000 m² par jour bénéficie de deux avantages majeurs : des variétés de marbre uniques au monde, telles que le jaune de Ghazaouet et le bleu de Tamanrasset, ainsi qu'un processus permettant de maîtriser les coûts de transport tout en offrant un rapport qualité-prix compétitif. Le marché européen, actuellement approvisionné par l'un des leaders mondiaux du secteur, notamment l'Inde, supporte des frais fixes de transport et de logistique considérables. C'est un poste de dépense que les entreprises européennes pourraient considérablement réduire grâce à notre offre, a expliqué Omar Hasnaoui. Nous avons l'ambition de devenir un acteur sérieux sur le marché mondial.

L'Algérie dispose de cinq gisements en activité, trois de marbre et deux de granite dans les provinces de Tlemcen, Ghazaouet, Tamanrasset et Saïda **[152]**.

I.4.5.6. Recyclage de déchets de granite dans le monde

Le taux de recyclage des déchets de granite est très faible à l'échelle mondiale et se concentre principalement dans les secteurs industriel et de la construction. La figure I.56 fournit des données sur la quantité de déchets de granite et les taux de recyclage pour différents pays du monde.

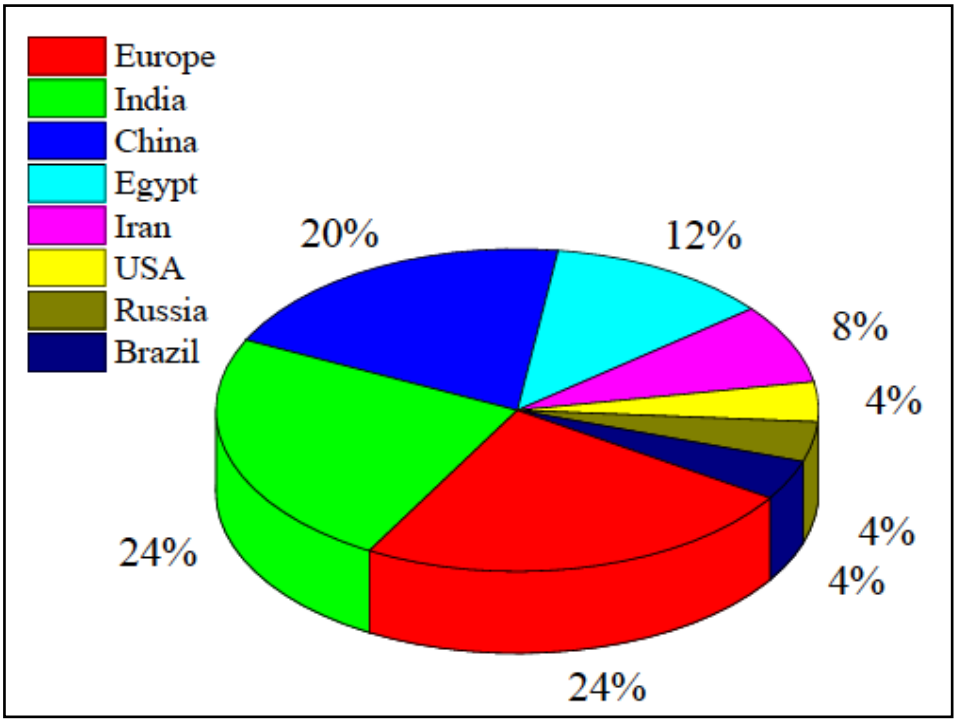


***Figure I.56**:Recyclage de déchets de granite comme matériaux de construction dans différents pays* **[153]**.

I.4.5.7.Recyclage de déchets de granite en l'Algérie

Selon l'Agence nationale de gestions des déchets (AND), une étude portant sur la stratégie nationale et le plan d'action de la gestion intégrée et de la valorisation des déchets (SNGID) en Algérie d'ici 2035 indique que le pourcentage total des déchets de granite produits par jour et par habitant passera de 2,2 % par rapport les outres déchets solides. À ce jour, la mise en œuvre de la SNGID aura pour effet non seulement de réduire la production de déchets de granite, mais aussi celle des autres flux de déchets. Selon les statistiques de l'étude, le taux de valorisation des déchets solides devrait atteindre 47 % d'ici 2035, tandis que celui des déchets inertes devrait atteindre 60 % (***source auteur***).

I.4.6. Effet de granulats de granite sur l'état frais du béton

I.4.6.1.Influence de granulats de granite sur l'ouvrabilité

Le contenu et les caractéristiques des particules de granite recyclé peuvent jouer un rôle crucial dans la façon dont le béton peut être travaillé. Une surface rugueuse, une texture robuste, une absorption d'eau modérée et une adhérence plus forte entre les particules de sable de granite (SG) et les pâtes de ciment peuvent impacter la maniabilité du béton. Cela peut conduire à une augmentation relative du rapport eau/ciment, ce qui signifie une augmentation de la quantité d'eau effective dans le mélange de béton, pouvant également améliorer la maniabilité du béton frais. Les résultats sont influencés par l'interaction entre la taille, la forme et la texture des particules de granite recyclé ainsi que leur composition **[154]**.

Comme le montre la figure I.57, la tendance générale observée par plusieurs chercheurs **[155-160]** est que le remplacement partiel du sable naturel dans les mélanges de béton par du sable de granite entraîne une diminution de la maniabilité à mesure que le pourcentage de granulats de granite augmente **[161]**.

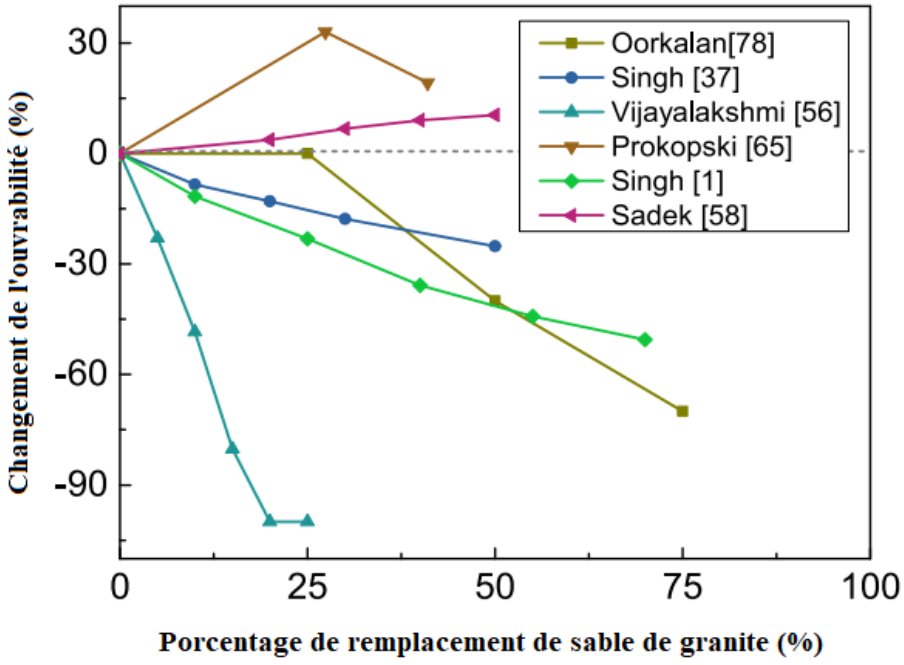


***Figure I.57**:Effet du niveau de remplacement de granulats de granite sur la variation de l'ouvrabilité de bétons* **[161]**.

Singh et al. **[162]** ont évalué l'impact de l'inclusion de déchets de taille de granite en remplacement partiel du sable naturel dans le béton. Les remplacements ont été effectués par

étapes de 10 %, 20 %, 30 % et 50 %. Il a été observé qu'au fur et à mesure que le pourcentage de remplacement augmentait, le béton présentait des valeurs d'affaissement progressivement plus faibles, indiquant une perte d'ouvrabilité due aux caractéristiques morphologiques rugueuses et angulaires des particules de granite.

Raghavendra et al. **[163]** ont étudié l'effet de granite sur l'ouvrabilité du béton. Il a été observé que pour tous les pourcentages de remplacement jusqu'à 25 %, le béton substitué par le granite présentait une ouvrabilité faible et comparable à celle du béton témoin.

Singh et al. **[162]** ont utilisé des déchets de coupe de granite (DCG) pour remplacer le sable naturel de 0 % à 40 % dans le béton et ont observé une diminution de l'ouvrabilité du béton à mesure que le pourcentage de DCG augmentait, comme l'indiquent les valeurs d'affaissement.

Adigun **[164]** a observé des résultats contraires lorsque la poussière de granite broyé a été utilisée pour remplacer le sable naturel dans des pourcentages variables de 0 % à 100 %. Il a été observé que pour des rapports eau-ciment fixes de 0,42 et 0,45 pour deux mélanges nominaux différents composés de neuf mélanges d'essai, la valeur d'affaissement augmentait avec l'augmentation de la teneur en poudre de granite broyé.

Singh et al. **[165]** ont observé une diminution des valeurs d'affaissement avec l'augmentation du pourcentage de déchets de granite et ils ont attribué cette perte d'ouvrabilité à l'augmentation de la viscosité du béton.

De plus, Harur et al. **[166]** ont observé l'ouvrabilité du béton lorsque le sable naturel était remplacé par le déchets de granite pour des rapports E/C fixes de 0,55, 0,45 et 0,40. Les mélanges de béton contenant des pourcentages variables de 10 % à 50 % de déchets de granite en remplacement du sable ont enregistré des valeurs d'affaissement améliorées par rapport au béton de contrôle.

Cordeiro et al. **[167]** ont signalé un effet négatif sur les propriétés rhéologiques des mélanges de béton lors de l'utilisation du déchets de granite comme substitut du sable de rivière. Cependant, l'ajout d'un superplastifiant (SP) a atténué cet effet.

I.4.7. Effet de granulats de granite sur l'état durci du béton

I.4.7.1.Influence de granulats de granite sur les résistances mécaniques

Les propriétés des particules de granite produisent des effets positifs sur les résistances mécaniques à plusieurs égards. Premièrement, la présence de granit recyclé facilite l'obtention d'une distribution homogène des granulats en raison de la bonne géométrie du granite recyclé. Deuxièmement, la grande dureté du granite recyclé contribue à cette résistance accrue. Troisièmement, la surface rugueuse et la forme angulaire favorisent une forte adhérence entre les granulats de granite et la pâte cimentaire **[168]**.

De plus, la contamination ainsi que la teneur en matière siliceuse (SiO_2) et en oxyde de calcium (CaO) du granite recyclé peuvent avoir des effets positifs sur le développement des résistances et des résultats finaux, à condition que le granite recyclé ne soit pas correctement traité. Les facteurs qui influent sur la résistance à la compression s'appliquent également à la résistance à la flexion ; le granite recyclé a des effets similaires sur la résistance à la flexion du béton **[168]**.

a) Résistance à la compression

La résistance ultime offerte par le bloc de béton avant qu'il ne cède à la charge de compression appliquée peut être appelée résistance à la compression du béton. La figure I.58 illustre l'analyse comparative du pourcentage optimal de remplacement du sable naturel par le sable de granite recyclé pour une résistance maximale à la compression, tel que proposé par divers chercheurs éminents **[169]**.

Le développement de la résistance à la compression du béton est régi par le rapport eau-ciment et la liaison à l'interface de la pâte de ciment hydratée et des granulats. La résistance de chaque matériau constitutif du mélange de béton a également une certaine influence sur la résistance du mélange de béton. L'étude montre que les particules de granite ont une résistance comparable à celle des particules de sable naturel. La matrice ou microstructure du béton de granite est dense et présente une meilleure dispersion des grains de ciment, ce qui se traduit en fin de compte par une meilleure résistance à la compression du mélange de béton de granite à des taux de remplacement inférieurs à 50 % **[169]**.

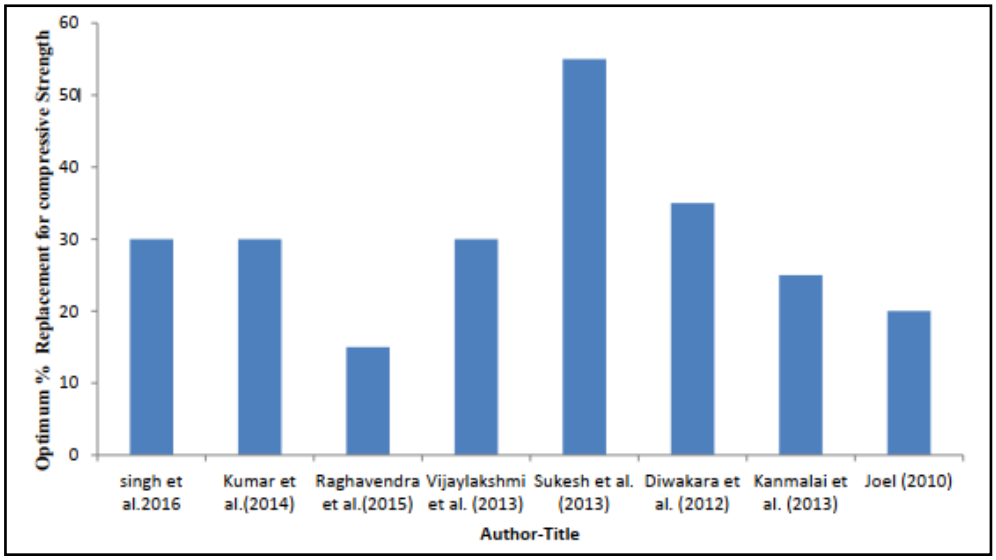


***Figure I.58**:Pourcentage optimal de remplacement proposé par divers chercheurs pour une résistance maximale à la compression* **[169]**.

Singh et al. **[156]** ont évalué l'impact de l'inclusion de déchets de taille de granite en remplacement partiel du sable naturel dans le béton. Les remplacements ont été effectués par paliers de 10 %, 20 %, 30 % et 50 %. La valeur maximale de la résistance à la compression a été observée, correspondant au pourcentage de remplacement de 30 %. À 50 %, la résistance à la compression observée était comparable à celle du béton témoin.

Nuaklong et al. **[170]** ont étudié l'effet du remplacement de 25 et 50 % du sable de rivière naturel par des déchets de granite (DG) sur les propriétés du béton géopolymère. Il a été constaté que l'augmentation de la proportion de DG dans le mélange entraînait une augmentation de la résistance à la compression, précoce, qui s'est améliorée lorsque 50 % du sable naturel a été remplacé par des déchets de granite.

Adigun **[164]** a démontré que le développement de la résistance à la compression dans le béton de poussière de granite concassé est plus élevé que les mélanges de contrôle, jusqu'à 75% de remplacement et comparable à des substitutions plus élevées. L'augmentation de la résistance initiale est également plus élevée dans le béton de granite. L'augmentation de la résistance à la compression est attribuée au fait que les particules de granite rugueuses et irrégulières remplissent le vide et ont une résistance au frottement plus élevée.

Zafar et al. **[171]** ont étudié l'influence des déchets de granite (DG) sur la résistance à la compression du béton autoplacant (BAP) en remplacement partiel des granulats fins (sable

de rivière). Les déchets de granite ont été incorporés pour remplacer les granulats fins dans une proportion de 0 à 100 %, avec un incrément de 20 %. Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des mélanges BAP ont augmenté lors de l'incorporation de jusqu'à 40 % de DG et de jusqu'à 60 % de DG respectivement (voir la figure I.59).

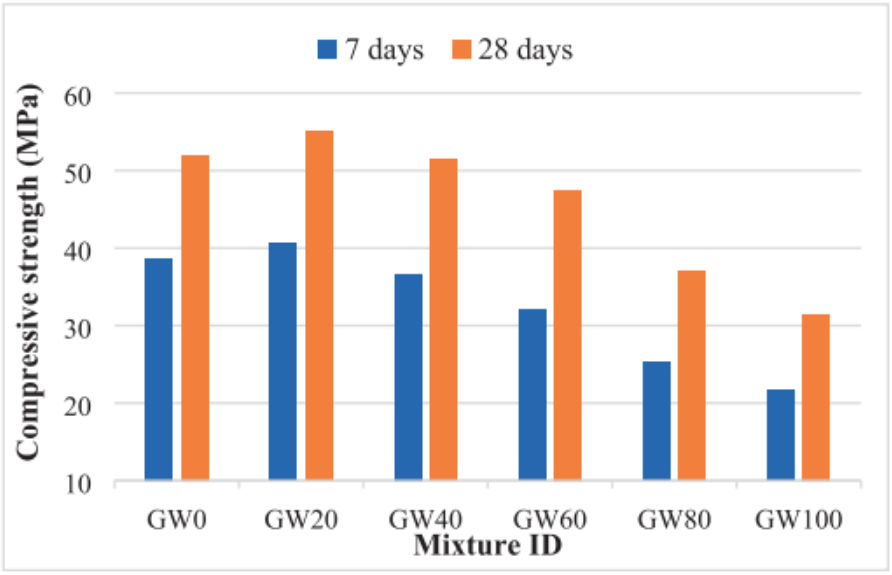


***Figure I.59**:Résistance à la compression des BAP modifiées par le déchet de granite* **[171]**.

Cordeiro et al. **[167]** rapportent que la résistance à la compression n'a pas été affectée négativement par le remplacement du sable naturel jusqu'à 50% de déchets de granite (voir tableau I.8).

***Tableau I.8**:Variation de la résistance à la compression du béton* **[167]**.

Mélanges	**Résistance à la compression (MPa)**	
	7 jours	**28 jours**
C-REF	44.4 (1.6%)	53.8 (4.9%)
C-CGA10	42.8 (7.2%)	51.6 (2.2%)
C-CGA30	46.1 (2.2%)	52.9 (2.3%)
C-CGA50	48.3 (4.0%)	58.0 (0.5%)
C-CGA50-2	-	57.9 (4.6%)

Binici et al. **[172]** ont étudié l'effet de l'utilisation de granulat de granite (GG) comme remplacement partiel du sable naturel. Les GG ont été incorporés pour remplacer les granulats fins dans une proportion de 0 à 100 %, avec un incrément de 10 %. Les résultats ont montré que l'utilisation de GG permettait une augmentation significative de la résistance à la compression du béton, comme montré dans la figure I.60.

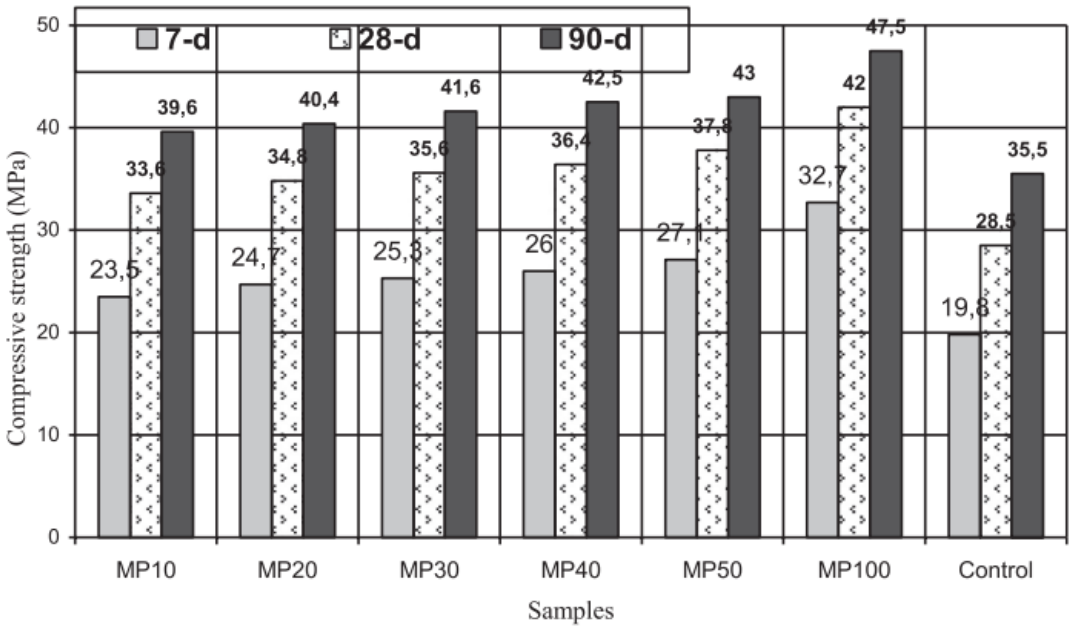


***Figure I.60**:Résistance à la compression des échantillons de bétons à base de GG* **[172].**

b) Résistance à la traction par flexion

De manière similaire à ce qui a été observé pour la résistance à la compression, la plupart des recherches montrent que l'utilisation de granulats de granite a des répercussions similaires sur la résistance à la traction du béton. Comme le montre la figure I.61, la tendance générale observée par la majorette des chercheurs **[128, 144, 155, 156, 171, 173]** est que le remplacement partiel du sable naturel dans les mélanges de béton par du sable de granite entraîne une augmentation de la résistance à la traction à mesure que le pourcentage de granulats de granite augmente **[161]**.

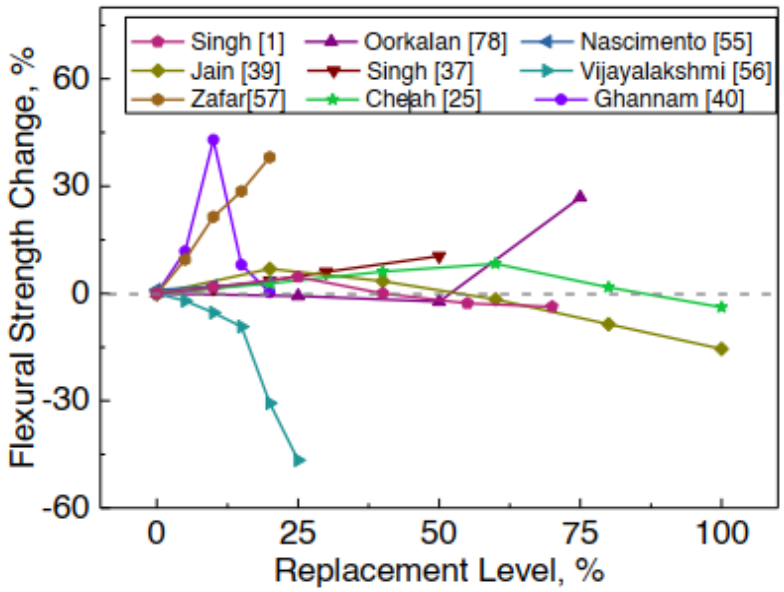


***Figure I.61**:Effet du niveau de remplacement de granulats de granite sur la variation de la résistance à la traction de bétons* **[161]**.

Singh et al. **[155]** ont évalué l'impact du remplacement des granulats fins par des déchets de coupe de granite sur une foule de caractéristiques mécaniques. Les expériences ont été menées avec les rapports 0,3, 0,35 et 0,4 w/c et pour les pourcentages de remplacement de 0 %, 10 %, 25 %, 40 %, 55 % et 70 % respectivement. La valeur maximale de la résistance à la flexion a été observée pour le pourcentage de remplacement de 40 %. La valeur de la résistance à la flexion s'est avérée comparable à celle du béton de contrôle pour un pourcentage de remplacement de 70 %.

Chiranjeevi Reddy et al. **[174]** ont étudié l'impact du remplacement des granulats fins par des fines de granite sur les propriétés mécaniques du mélange de béton. Les pourcentages de remplacement effectués étaient respectivement de 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %. Il a été constaté que les spécimens de béton avec un pourcentage de remplacement de 7,5 % présentaient une augmentation maximale de la résistance à la flexion. Les spécimens de béton avec un pourcentage de remplacement de 10 % ont présenté une résistance à la flexion comparable à celle du béton de contrôle.

Singh et al. **[162]** ont observé que la résistance à la flexion de l'échantillon de béton déchets de granite (DG) était plus élevée que celle de l'échantillon de béton témoin aux âges de cure de 7 et 28 jours. Ils ont observé qu'à 28 jours, le mélange de béton contenant 50 % de

DG a enregistré une augmentation de 31 % de la résistance à la flexion par rapport à celle du béton témoin.

De plus, la figure I.62 illustre l'analyse comparative du pourcentage optimal de remplacement du sable naturel par le déchets de granite pour une résistance maximale à la traction par flexions, comme l'ont proposé divers chercheurs éminents **[169]**.

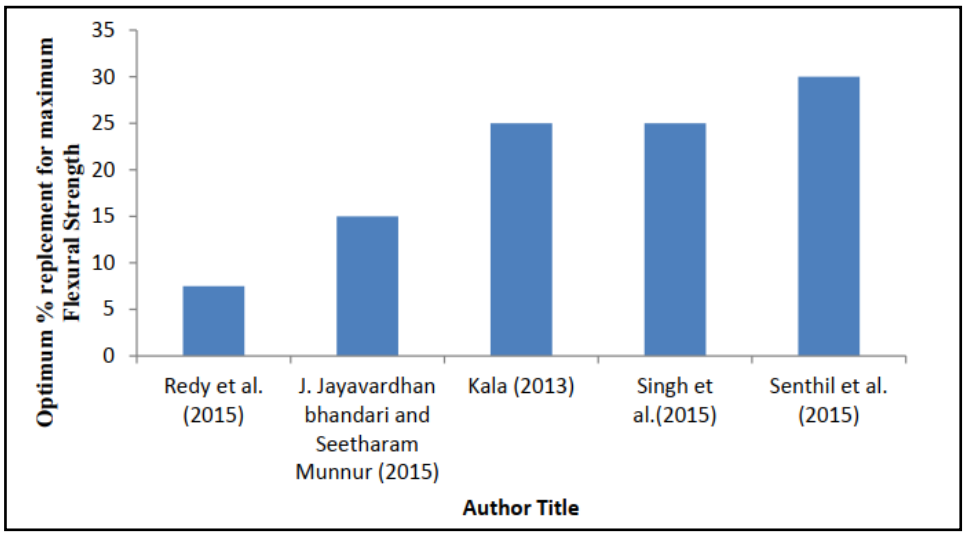


***Figure I.62**:Pourcentage optimal de remplacement proposé par divers chercheurs pour une résistance maximale à la flexion* **[169]**.

Sailalasa et Reddy **[175]** ont observé que l'échantillon de béton contenant 20 % de granulats fin de granite a montré une résistance à la flexion améliorée par rapport à l'échantillon de contrôle à l'âge de durcissement de 28 jours.

Martins et al. **[176]** ont utilisé le déchets de granite dans le béton ordinaire pour remplacer le sable naturel, dans des pourcentages de 10, 20, 30, 40 et 50 % en poids. Les propriétés mécaniques de résistance à la traction ont été analysées. Les auteurs ont conclu qu'à 28 jours et jusqu'à 40% de remplacement, la résistance à la traction était améliorée. À partir de 50 % de remplacement, les mêmes propriétés ont commencé à diminuer. Cependant, ils ont présenté de meilleurs résultats que le béton de référence.

Dhanapandian et al. **[177]** ont évalué la faisabilité de l'utilisation de déchets de granite et de marbre comme granulats fins dans la fabrication de béton. Ils ont constaté que le pourcentage optimal de remplacement de déchets de granite et de marbre en tant que matière première était de 50 %. Une amélioration notable de la résistance à la flexion et à la a été observée à ce pourcentage de remplacement.

Jain et al. **[178]** ont étudié l'effet de granulats de granite fin (GG) sur la variation de la résistance à la traction du béton autoplacant (BAP). Le GG a été utilisé à un niveau de remplacement progressif de 20 % des granulats fins (c'est-à-dire du sable de rivière) jusqu'à 100 %. Un rapport E/C fixe de 0,36 a été utilisé. L'incorporation de GG dans les mélanges BAP a montré une augmentation de la résistance à la flexion (figure I.63) à un niveau de remplacement de 20 % et une diminution des deux caractéristiques de résistance au-delà de 20 % de remplacement. En outre, même à un niveau de remplacement de 40 %, la résistance à la flexion s'est avérée plus élevée par rapport au mélange témoin.

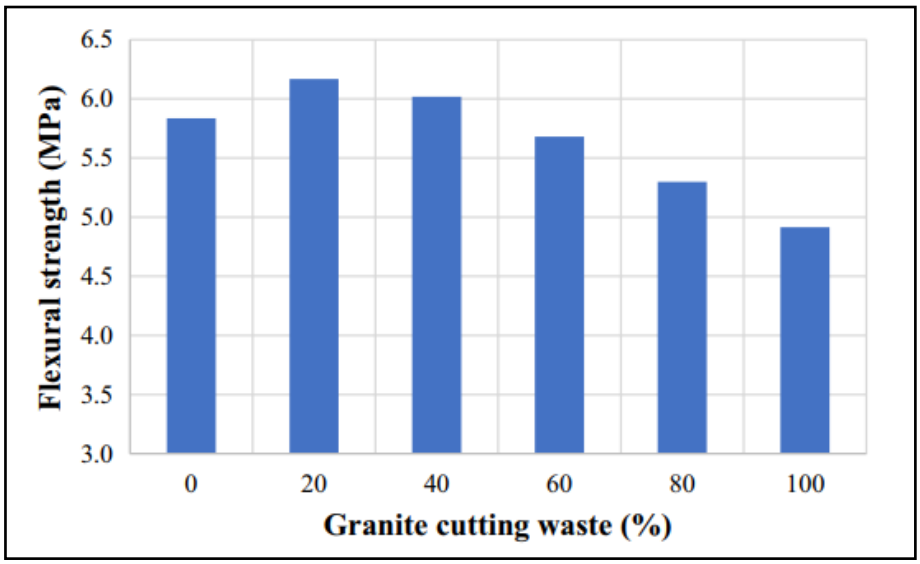


***Figure III.63**:Valeurs de résistance à la flexion des échantillons BAP avec différents pourcentages de déchets de coupe de granite* **[178]**.

c) Module d'élasticité

Puisque le module d'élasticité du granite est supérieur à celui des granulats naturels, on peut s'attendre à ce que l'incorporation de granite recyclé entraîne une augmentation du module d'élasticité du béton de granite recyclé. Bien que la présence de granite puisse entraîner une augmentation de la résistance du béton, le module d'élasticité peut toujours être supérieur au béton sans granulats de granite recyclé, lorsque les rapports E/C sont similaires **[179]**. Le module d'élasticité est un paramètre physique qui reflète le comportement mécanique d'un matériau en réponse aux contraintes induites par la charge. Plusieurs chercheurs ont testé des modules d'élasticité **[169]**.

Donza et al. **[180]** ont observé dans leur étude que pour tous les âges d'essai, la valeur du module d'élasticité des éprouvettes S-530 (béton de sable granitique avec 530 kg/m3 de

sable granitique) était plus élevée que celle des éprouvettes G-530 correspondantes (béton de sable naturel avec 530 kg/m3 de sable naturel).

Felixkala et Partheeban **[181]** ont étudié les propriétés du béton avec des déchets de granite en remplacement partiel du granulat fin (sable) dans le béton. Il a été observé que le module d'élasticité présentait une tendance similaire à celle observée pour la résistance à la traction fractionnée. La valeur du module d'élasticité à 50 % de remplacement était légèrement supérieure à celle du béton témoin. Cependant, tout remplacement au-delà de 25 % entraîne une réduction de la valeur par rapport au béton témoin.

Williams et al. **[182]** ont observé que le module d'élasticité des spécimens de béton substitués par du granite était similaire à celui du béton témoin. De plus, à 25 % de remplacement et à 90 jours de cure, la valeur du module d'élasticité a augmenté de 2 % par rapport à celle du béton témoin. Ceci a été attribué à l'augmentation de la résistance avec l'âge de durcissement.

Vijayalakshmi et al. **[157]** ont observé que le module d'élasticité diminue lorsque le taux de substitution de la poussière de granite est augmenté. La valeur du module d'élasticité des mélanges contenant 5 %, 10 % et 15 % de poussière de granite était comparable au béton témoin.

Felixkala et Sethuraman **[183]** ont conçu un béton avec 27,5 % d'adjuvants minéraux remplaçant le ciment. Il a constaté que 25% de poussière de granite en remplacement du sable a montré 10,16 et 18,54% d'augmentation du module d'élasticité par rapport au mélange de contrôle, et c'était donc la quantité optimale pour obtenir un module d'élasticité.

Seules quelques études ont été menées pour évaluer l'effet du remplacement du sable naturel par de déchets des granite. Parmi ces études, des résultats mitigés ont été rapportés dans le sens où certains chercheurs ont rapporté une augmentation tandis que d'autres ont rapporté une diminution des valeurs du module d'élasticité lorsque le sable a été partiellement remplacé par le sable du granite **[169]**.

d) Vitesse d'impulsion ultrasonique

Le test de la vitesse d'impulsion ultrasonique **(**UPV) est une technique non destructive (NDT) couramment utilisée dans le monde entier pour évaluer la qualité de la matrice de béton en termes de cohésion, de porosité et d'imperfection, etc. Plus la vitesse d'impulsion

entre l'émetteur et le transducteur installés sur l'échantillon de béton est élevée, plus la matrice de béton est dense et compacte **[169]**.

Singh et al. **[162]** ont observé que le béton granulat de déchets de granite affichait une valeur de vitesse d'impulsion comparable à celle de l'échantillon de mélange témoin.

Jain et al. **[178]** ont rapporté que les valeurs UPV ont d'abord augmenté à 20 % d'incorporation de granulats de déchets de granite (GDG), puis ont diminué avec l'augmentation du niveau de substitution de GDG. Cependant, même à un niveau de remplacement de 40 % de GDG dans le mélange de béton autoplaçant (BAP), la valeur UPV s'est avérée comparable à l'échantillon BAP préparé sans GDG. La valeur UPV la plus élevée (5370.4 m/sec) a été observée pour le mélange G20, tandis que la valeur UPV la plus basse (4064.7 m/sec) a été observée pour le mélange G100.

De plus, Jain et al. **[178]** ont signalé que la taille plus petite (figure I.64) et la forme irrégulière des particules de GDG (figure I.65) par rapport au sable améliorent la densification des mélanges BAP, ce qui se traduit en fin de compte par des valeurs UPV plus élevées. Cependant, l'incorporation de GDG en tant que substitution de granulat fin dans le béton développe la densification de la matrice de béton jusqu'à une certaine limite **[156]**.

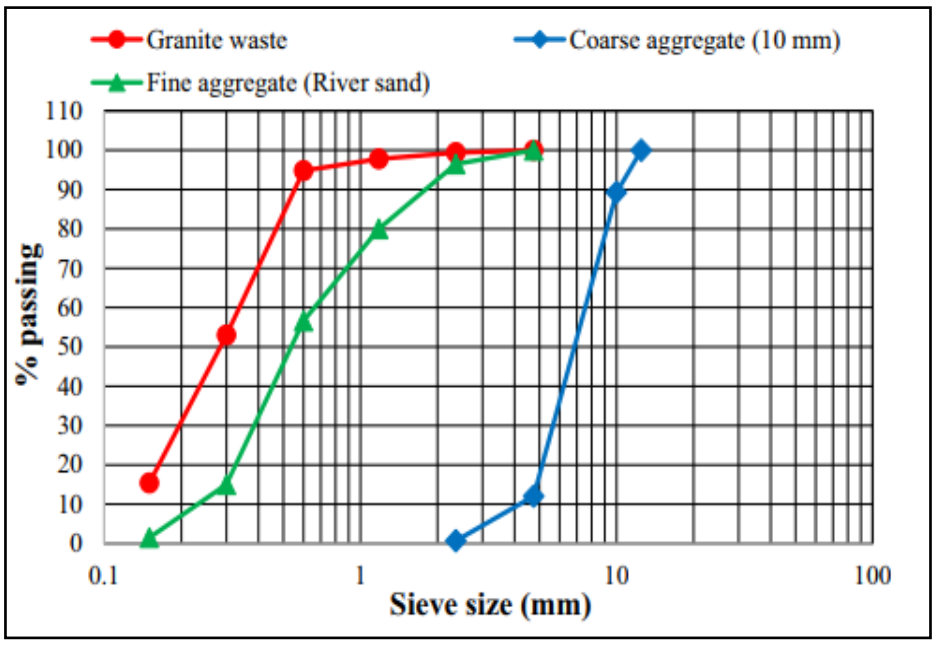


***Figure I.64**: Distribution granulométrique des déchets de coupe de granite* **[178]**.

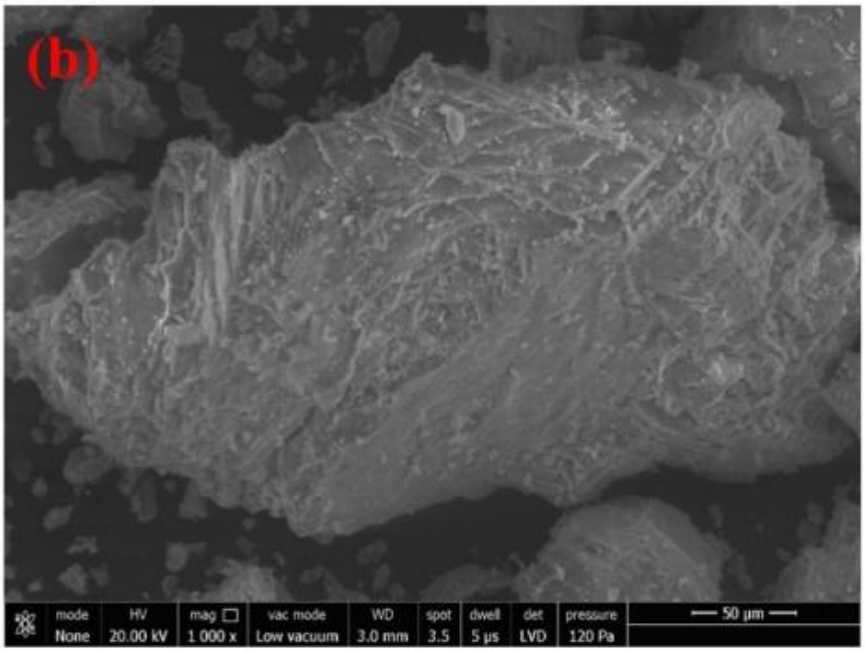


Figure I.65*:Images au microscope électronique à balayage de déchets de coupe de granite* **[178]**.

e) Densité

La densité ou le poids unitaire d'un matériau est une propriété physique qui traduit directement ou indirectement l'état de compacité et de densité de la matrice du béton dans une certaine mesure. Très peu de données relatives à la mesure de la densité du béton de substitution au granite sont disponibles dans la littérature publiée. Les données rapportées montrent que lorsque les déchets de granite sont utilisés comme granulat fin dans le béton, il y a une légère diminution du poids unitaire du béton. L'étude bibliographique révèle que le remplacement du sable naturel par des déchets de granits entraîne généralement une diminution du poids unitaire du béton obtenu.

Singh et al. **[162]** ont démontré que l'utilisation de GDG ayant un poids spécifique de 2,62 comme remplacement des granulats fins dans le béton a entraîné une diminution mineure de la densité du béton. Pour un remplacement de 40 %, la diminution correspondante du poids unitaire s'est avérée être de 5,3 %.

Falade **[184]** a étudié l'effet de l'utilisation de fines granitiques de différentes tailles sur les propriétés du béton. Sept gammes de tailles différentes, à savoir 4,75-0,063 mm, 4,75-3,35 mm, 3,35-2,36 mm, 2,36-1,70 mm, 1,7-1,18 mm, 1,18-0,3 mm, 0,30-0,063 mm et 4,75-0,063 mm, ont été utilisées dans l'étude. Il a été constaté que la densité correspondante du mélange

de béton diminuait au fur et à mesure que la taille des particules des fines de granite utilisées diminuait.

Cependant, Harur et al. **[169]** ont observé que la densité du béton contenant jusqu'à 50 % de granite comme remplacement de granulat fin pour un rapport E/C de 0,55, 0,45 et 0,40 a présenté une légère augmentation par rapport à celle du béton de contrôle.

I.4.7.2.Influence de granulats de granite sur les propriétés de durabilité des bétons

a) Résistance à l'Abrasion

L'abrasion est typiquement l'existence d'un frottement entre deux substrats dont les propriétés et les caractéristiques intrinsèques sont quelque peu différentes. La résistance à l'abrasion est définie comme le potentiel de résistance à toute usure de surface due à l'action du frottement et de la friction. L'usure des échantillons de béton dépend à la fois de la charge normale, qui favorise la pénétration des particules abrasives à l'intérieur de l'échantillon, et de la force de cisaillement, qui induit une friction et une résistance au mouvement, créant ainsi des rainures et des rayures à la surface de l'échantillon. La porosité de la surface et la résistance à l'écrasement des granulats de granite jouent un rôle essentiel dans la résistance à l'abrasion de béton **[169]**.

La résistance à l'abrasion est liée à plusieurs facteurs essentiels. Diverses études montrent qu'il existe une corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à l'abrasion (Singh et Siddique **[185]**). Cependant, dans une autre étude réalisée par Atis et Celik (2002), la résistance à l'abrasion s'est avérée être plus liée à la résistance à la flexion qu'à la résistance à la compression. Scholz et Keshari **[186]** ont également constaté que les mélanges ayant une teneur plus élevée en matériau cimentaire et un rapport eau/ciment plus faible présentaient une meilleure résistance à l'abrasion, ce qui corrobore les résultats de l'essai.

Singh et al. **[187]** ont évalué la faisabilité du sous-produit de l'industrie du granite (GIB) en tant que substitut possible du sable naturel dans la fabrication du béton. Pour un rapport eau/ciment de 0,50, des études de faisabilité ont été réalisées et des analyses ont été effectuées pour 10, 25, 40, 55 et 70 % de remplacement du sable naturel par du GIB dans la fabrication du béton. Les résultats du test d'abrasion montrent que tous les mélanges de béton à base de GIB (0-70%) présentent une profondeur d'usure similaire, le GIB40 (40%) étant le moins usé (1,74 mm). La résistance à l'abrasion est définie comme le potentiel de résistance à

toute usure de surface due à l'action du frottement et à l'abrasion. Comme le montre la figure I.66, la profondeur d'usure diminue avec l'augmentation de la quantité de substitution de GIB, ce qui est attribué à une faible porosité et donc à une plus grande surface de contact, ainsi qu'à une plus grande résistance à la compression et à la flexion du béton, ce qui se traduit par une plus grande résistance à l'abrasion.

Singh et al. **[162]** ont constaté que l'utilisation de déchets de granite (DG) comme granulat fin permettait d'obtenir une propriété de résistance à l'abrasion supérieure. Pour le béton contenant 20 % de DG, la diminution observée de la profondeur d'usure par rapport au béton témoin était de 10 %.

Singh et al. **[165]** ont constaté que la résistance à l'abrasion du béton contenant jusqu'à 40 % de déchets de granite (DG) était meilleure que celle du béton témoin. La profondeur maximale de l'usure s'est produite à 70 % (1,95 mm) de remplacement du sable naturel.

Singh et al. **[155]** ont étudié l'influence de déchets de granite (DG) comme granulat fin sur la résistance à l'abrasion des échantillons de béton. Une profondeur d'usure minimale pour un rapport E/C de 0,40, 0,35 et 0,30 a été observée pour des teneurs en DG de 25 %, 40 % et 40 % respectivement.

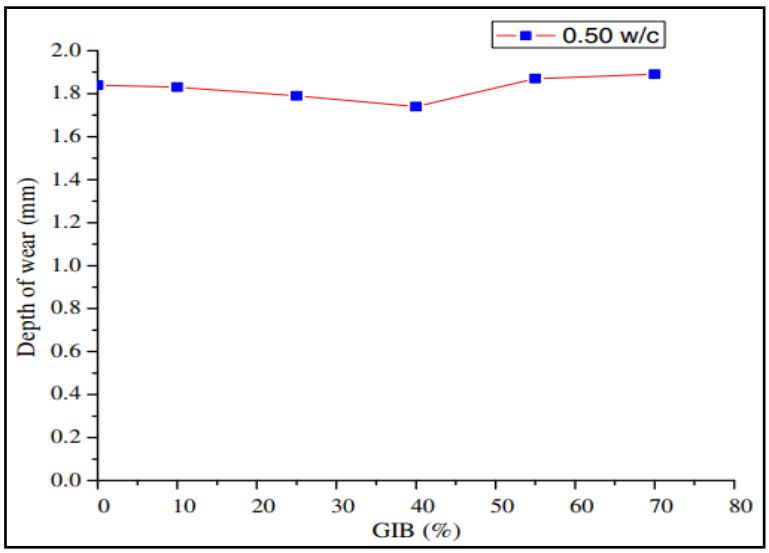


***Figure I.66**: Abrasion de divers mélanges de béton (profondeur de l'usure en fonction de la teneur en GW)* **[187]**.

Singh et al. **[156]** ont évalué l'impact de l'inclusion de déchets de taille de granite en remplacement partiel du sable naturel dans le béton. Les remplacements ont été effectués par

étapes de 10 %, 20 %, 30 % et 50 %. Il a été observé que la résistance à l'abrasion augmentait au fur et à mesure que le pourcentage de remplacement augmentait jusqu'à 30 %. Il a donc été conseillé d'utiliser ce type de béton dans des applications où une résistance élevée à l'abrasion est requise, telles que les pavés, etc.

Enfin, l'analyse de la littérature révèle que les études sur l'abrasion n'ont été menées que récemment. La résistance à l'abrasion du béton avec un pourcentage optimal de déchets de granite en remplacement partiel du sable naturel est généralement plus élevée que celle du béton de contrôle **[169]**.

b) Résistivité électrique

La résistivité électrique est une mesure de la résistance offerte par la matrice du béton au flux d'ions qui la traverse. La résistivité électrique du béton est liée à la structure des pores de la matrice. Plus la résistivité électrique est élevée, plus la résistance à la corrosion est importante.

Vijayalakshmi et al. **[157]** ont démontré qu'avec l'augmentation du taux de substitution de déchets de granite en remplacement partiel du sable naturel, le module de finesse du sable augmente. Par conséquent, la résistivité électrique des mélanges de béton est réduite.

c) 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 des 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. L'absorption d'eau a été utilisée comme un facteur important pour quantifier la durabilité des systèmes cimentaires avec la zone des granulats **[188, 189]**.

Comme le montre la figure I.67, la tendance générale observée par la majorette des chercheurs **[126, 128, 159, 171, 173, 178, 190]** est que l'absorption d'eau du béton à base de déchets de granite montre une diminution avec un niveau de remplacement de sable naturel modéré, c'est-à-dire <40%. Une explication proposée par Singh et al. **[169]** est que la densification de la matrice du béton serait améliorée par les fines particules de déchets de granite, et qu'une absorption d'eau plus faible serait donc observée.

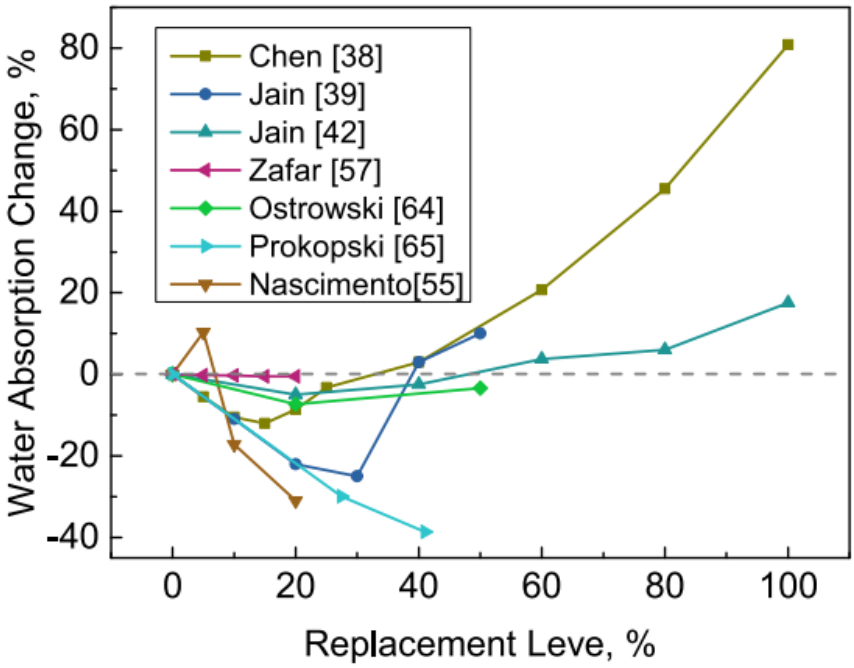


***Figure I.67**: Effet du substitution de déchets de granite sur l'absorption d'eau* **[161]**.

En général, l'absorption et la sorptivité, deux paramètres, sont des indicateurs de l'étendue de la porosité de la matrice du béton. La figure I.68 illustre l'analyse comparative du pourcentage optimal de remplacement du sable naturel par des déchets de granite pour une absorption d'eau minimale, tel que proposé par divers chercheurs éminents **[169]**.

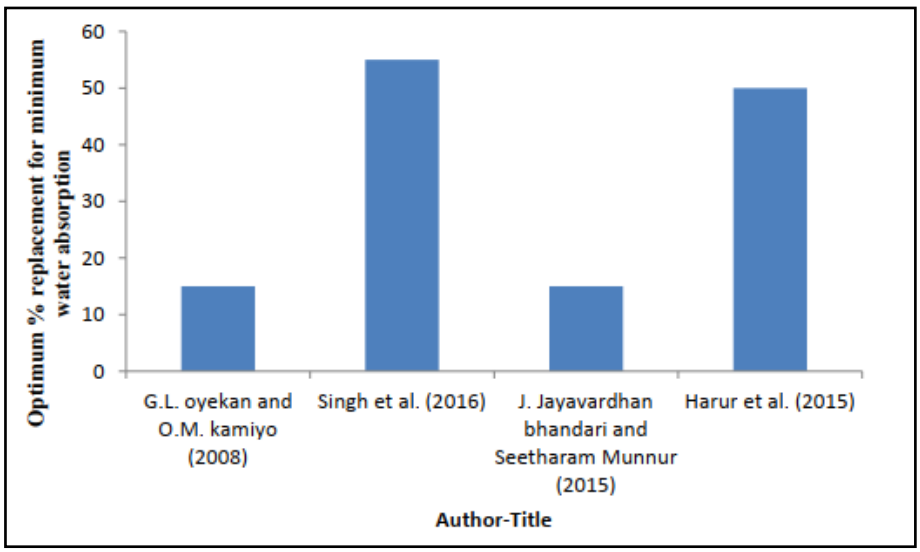


***Figure I.68**: Pourcentage optimal de remplacement proposé par divers chercheurs pour une absorption d'eau minimale* **[169]**.

Oyekan et Kamiyo **[191]** ont étudié l'effet de l'inclusion de fines de granite sur l'absorption d'eau et la sorptivité du béton de sable. L'absorption d'eau et la sorptivité des

spécimens de béton sableux se sont avérées être minimales pour un pourcentage de remplacement de 15 % du volume total des granulats fins par des fines de granite.

Bhandari et Munnur **[192]** ont examiné l'absorption d'eau du béton avec un remplacement partiel des granulats fins par des fines de granite. Le remplacement a été effectué par étapes de 5 % en commençant par 0 % et un maximum de 20 % de remplacement a été effectué. La valeur minimale d'absorption d'eau s'est avérée correspondre au pourcentage de remplacement de 15 %.

Singh et al. **[155]** ont évalué l'impact du remplacement des granulats fins par des déchets de coupe de granite sur les caractéristiques d'absorption d'eau du béton. Les expériences ont été menées avec des rapports E/C de 0,3, 0,35 et 0,4 et pour les pourcentages de remplacement de 0%, 10%, 25%, 40%, 55% et 70% respectivement. Le pourcentage de remplacement optimal s'est avéré être d'environ 55% en ce qui concerne l'absorption d'eau minimale.

Singh et al. ont **[165]** observé que l'absorption d'eau des échantillons de béton contenant du déchets de granite (DG) a diminué jusqu'à un niveau de substitution de 55%. Les particules de DG ont amélioré la densification de la microstructure du béton et ont donc conduit à une absorption d'eau plus faible.

On peut déduire de la littérature que lorsque le pourcentage de remplacement du sable naturel par les déchets de granite augmente, l'absorption d'eau et la sorptivité diminuent généralement.

d) 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 déchets de granite recyclé devient une préoccupation pour son application potentielle dans les structures **[193]**.

La perméabilité au chlorure, évaluée comme la capacité du béton à permettre la pénétration des ions chlorure, est un paramètre critique pour évaluer la durée de vie des structures en béton armé. Une étude détaillée sur le béton à base de fines de granite (FG) incluant le par Jain et al. **[128]** a révélé que le béton FG a une meilleure performance avec un

niveau de remplacement inférieur à 40 %. Au niveau de remplacement de 30 %, le passage de la charge était inférieur de 44 % à celui du béton a base de sable naturel (SN). Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Li et al. **[194]**. Vijayalakshmi et al. **[157]** ont observé des résultats contradictoires, la valeur de la charge augmentant avec un niveau de remplacement plus élevé. Une augmentation de charge de 330 % par rapport au béton SN a été observée à un niveau de remplacement de 25 %. Entre-temps, différents tests ont été effectués dans le cadre des travaux de Singh et al **[155]**. L'effet du FG sur la corrosion a été estimé conformément à la norme ASTM G109-99a. Des échantillons ont été placés dans une solution de $NaCl_2$, le courant de la macrocellule et le potentiel de la demi-cellule étant surveillés pendant une année. Les résultats ont montré que le taux de corrosion augmentait avec un rapport E/C plus élevé, tandis que le niveau de remplacement inférieur à 40 % n'avait pratiquement pas d'impact sur la corrosion.

En outre, jusqu'à présent, aucune conclusion générale n'a pu être tirée en raison du nombre limité de résultats de recherche **[157, 178, 194]**, comme le montre la figure I.69.

L'augmentation et la réduction de la perméabilité au chlorure ont été observées en raison de la variation des matières premières ayant des propriétés physiques différentes.

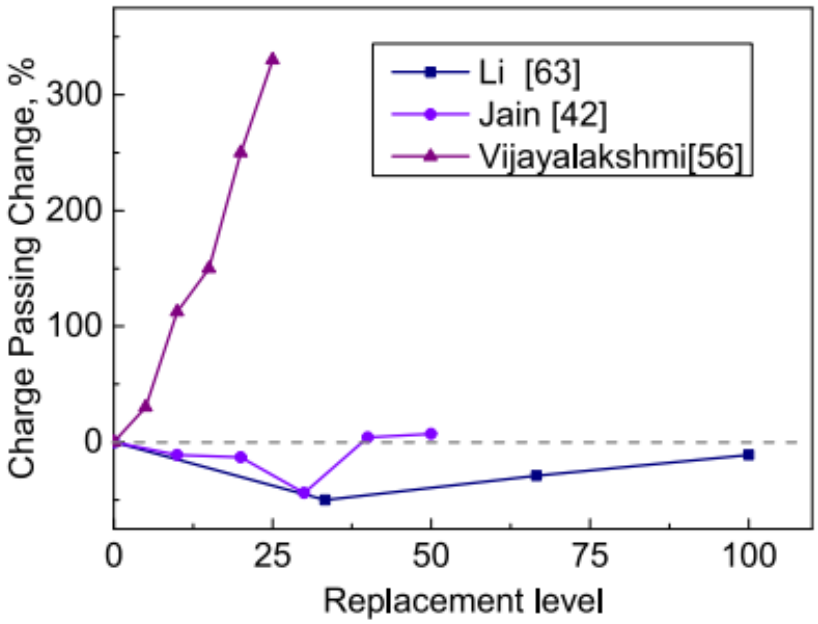


***Figure I.69**: Effet du niveau de la substituions de déchets de granite sur la pénétration des ions chlorure* **[161]**.

e) Attaque des sulfates

Les ions de sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfateuses 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 déchets de granite présente une bonne résistance à l'attaque de sulfate par rapport au béton normal. Il s'agit de la résistance et de la résilience du béton lorsqu'il est exposé à des agents chimiques contenant des sulfates **[195]**.

Vijayalakshmi et al. **[157]** ont étudié l'influence de la poussière de granite dans le béton sur sa durabilité à long terme. Dans l'enquête menée, ils ont établi que le béton contenant de la poussière de granite présentait des pertes significatives de résistance à la compression par rapport aux mélanges de contrôle et que l'augmentation du taux de substitution entraînait une augmentation de l'attaque par les sulfates. Il a été prédit que la durabilité était influencée par un matériau réactif présent dans la poussière de granite, d'où l'intérêt d'un traitement de la poussière de granite.

Comme le montrent la figure I.70, la plupart des rapports ont démontré que l'incorporation de déchets de granite pouvait améliorer ou maintenir la résistance au sulfate **[171, 196]**, sauf pour les bétons dont la compacité est inférieure en raison d'une mauvaise ouvrabilité à l'état frais, dans lesquels la perte de résistance sous l'attaque du sulfate a augmenté de 3 % à 30 % avec un niveau de remplacement de 5 % à 25 % **[157]**.

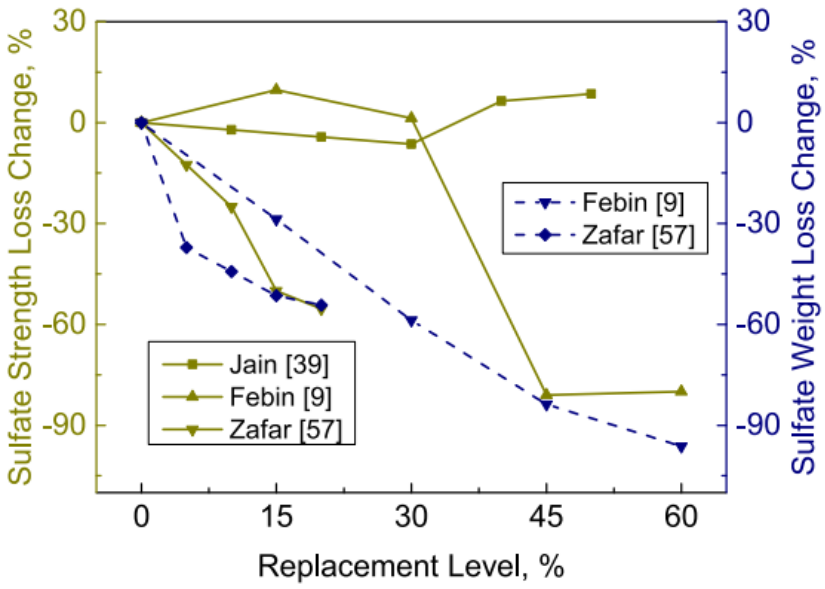


***Figure I.70**: Effet du niveau de remplacement sur la résistance au sulfate* **[161]**.

En outre, dans une étude approfondie de la durabilité du béton déchets de granite, Jain et al. **[128]** ont étudié les résistances aux attaques de sulfate en submergeant les spécimens dans des solutions de sulfate. La perte de résistance a été adoptée comme indicateur, dans lequel 30% de remplacement du sable naturel par les déchets de granite a été identifié comme le dosage optimal. Une augmentation supplémentaire du niveau de remplacement entraînerait une perte de résistance plus importante, voire pire que celle de l'échantillon de contrôle à un niveau de remplacement supérieur à 40 %.

I.5. CONCLUSION

Cette étude bibliographique a été effectuée d'une part pour faire le point des travaux de recherche sur les BSF et d'autre part sur l'utilisation des déchets et leurs effets sur les caractéristiques et les performances des mortiers et bétons afin de maitriser 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 granite recyclé (SG) et de la poudre de coquillage (PC) dans l'amélioration des performances des bétons. D'après l'analyse documentaire effectuée, toutes les études expérimentales ont été réalisées sur l'effet de SG ou la PC seule. 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 BSF écologiques.

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

La réutilisation des déchets de granite en tant que matériau de construction est un moyen prometteur pour réduire la quantité de granite 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 granite comme granulat dans les mélanges de béton/mortier a d'une part des effets positifs sur quelques propriétés telles que : la résistance à la compression, la perméabilité aux ions chlorure, l'absorption, l'attaque agressive par les acides et les sulfates et la réaction alcali-silice. D'autre part, l'utilisation de granite donne un inconvénient en termes de l'ouvrabilité. L'utilisation des matériaux pouzzolaniques comme la poudre de coquillage dans les systèmes cimentaires est une bonne option, car elle permettrait de réduire la quantité de CO_2 émise dans l'atmosphère et peut améliorer la durabilité du matériau produit. L'effet avantageux de la PC dans le béton est dû à son effet pouzzolanique, à l'accélération de l'hydratation du ciment et à son effet de remplissage entre les grains de ciment et les granulats.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

CHAPITRE II
MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente en première partie les matériaux utilisés avec leurs caractéristiques pour la fabrication des différents bétons de sable fluides étudiés. En plus, on s'intéressera à la méthode de formulation adoptée pour déterminé les différentes compositions essentiels des bétons de sable fluides. Dans une seconde partie, une présentation sur les différentes procédures expérimentales de fabrication, la séquence de malaxage, de mise en place et le mode de la conservation des éprouvettes. Enfin, on présentera les différentes essais réalisés en laboratoire sur les bétons de sable fluides à l'état frais et à l'état durci en laboratoire.

II.2. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

II.2.1. Ciment

Dans cette étude, le ciment utilisé pour tous les mélanges est un ciment Portland artificiel (CPA) de type CEM I 42.5 provenant de la cimenterie (M'SILA) qui est conforme à la norme EN 197-1: 2000 **[197]**. La surface spécifique de Blaine de ce ciment est de 3420 cm^2/g, est sa densité absolue est de 3,1 g/cm^3. La figure II.1 montre une image observée par l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) des grains de ce ciment. La composition chimique et les propriétés physiques du ciment sont présentées dans le tableau II.1. Les résultats de l'analyse granulométrique de la répartition granulaire du ciment utilisé sont présentées sur la figure II.2.

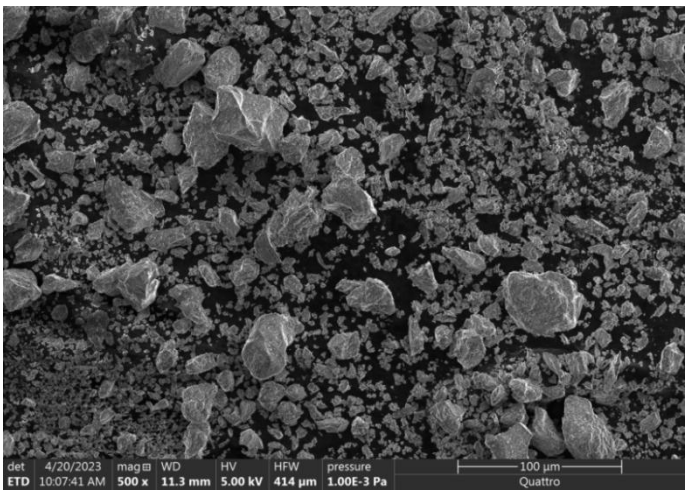


***Figure II.1** : Observation par MEB du ciment utilisé.*

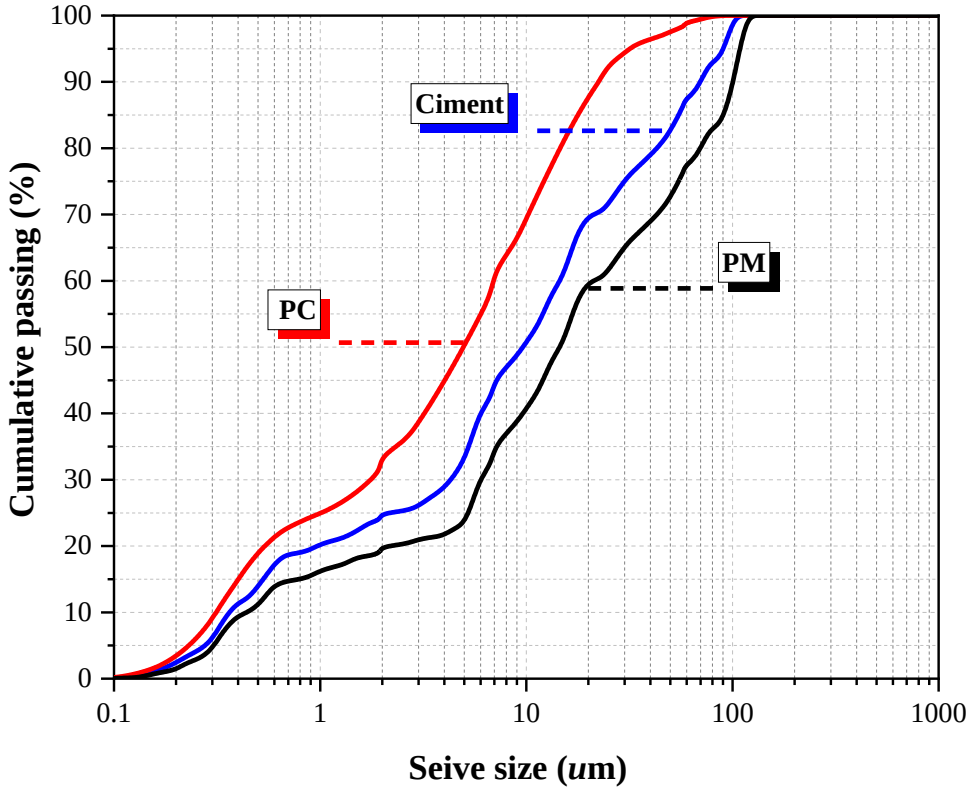


***Figure II.2** : Répartition granulaire du ciment, PM et PC utilisés.*

II.2.2. Filler de marbre

Le filler utilisé dans cette étude est une poudre de marbre (PM) d'une couleur blanche obtenue à partir de déchet de l'industrie du marbre disponibles dans la majorité des usines de marbrerie de la wilaya de Médéa. La PM est exploitée après concassage à l'aide d'un concasseur à mâchoire, suivi d'un broyage dans un broyeur à boulets (machine de Los Angeles) au laboratoire de l'université de Médéa et enfin par un tamisage à l'aide d'un tamis de l'ordre de 80 µm pour obtenir une poudre, comme le montre la figure II.3.

Elle est utilisée comme filler avec une surface spécifique de Blaine de 2700 cm^2/g. Les différentes compositions chimiques et les caractéristiques physiques de la poudre de marbre utilisée sont présentées dans le tableaux II.1. La courbe granulométrique de la répartition granulaire de la poudre de marbre utilisée est présentée sur la figure II.2. Les différentes compositions minéralogiques de la PM ont été déterminées par l'analyse de diffraction des rayons X (DRX) et leurs résultats sont présentés dans la figure II.4. Cette figure montre que la composition minéralogique de la teneur élevée du PM est constituée de quartz (1), de calcite (2) et de dolomite (3). La figure II.5 montre la morphologie du PM observée par l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB).



Figure II.3 *: Filler de la poudre de marbre.*

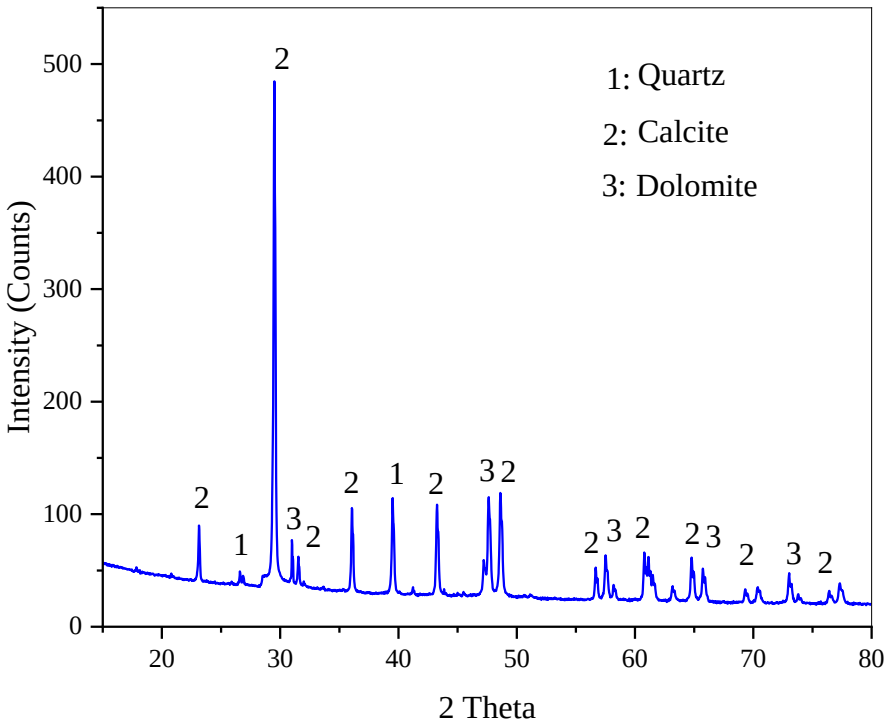


Figure II.4 *: Analyse minéralogique par DRX de la PM.*

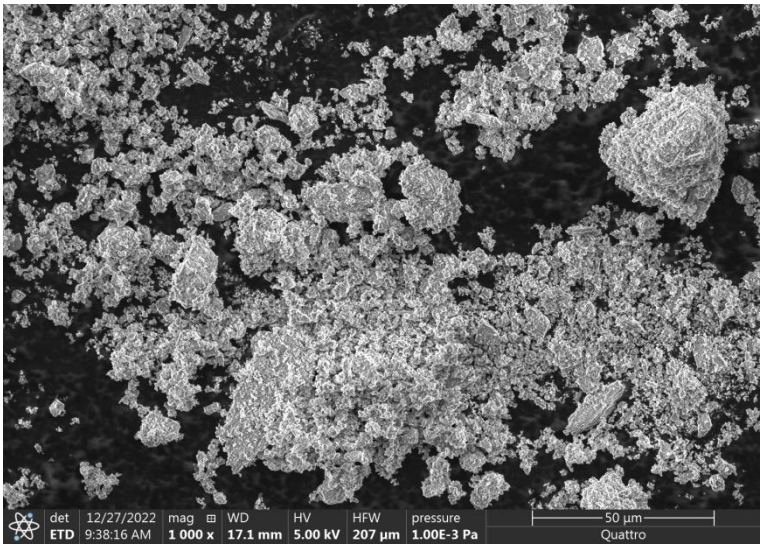


Figure II.5*: Observation par MEB de la PM.*

II.2.3. Poudre de coquillage

La poudre de coquillage (PC) utilisée au cours de ce travail est obtenue par le broyage des déchets de coquilles rejetés au bord de la majorité des plages algériennes exactement dans la wilaya de TIPAZA, commune de FOUKA. Ces déchets de coquilles sont soigneusement lavés pour éliminer toute trace de sable ou de sels. Les coquilles sont immergées dans un bain d'eau vinaigrée pendant 24 h afin de réduire les traces de matières organiques. Après 24 h, les elles sont lavées à l'eau et chauffées à 105 °C à l'aide d'un four électrique pendant 6 h pour atteindre un niveau de séchage complet.

Les coquilles sont broyées en une poudre de coquillage blanche brute dans un broyeur à boulets (machine de Los Angeles) afin qu'elles puissent passer au tamis de 63µm. La poudre de coquillage est obtenu en brûlant la poudre brute au four à 650 °C pendant 2 h. Après combustion, la couleur de la poudre devient gris clair. La poudre de coquillage finale est obtenu après refroidissement à température ambiante pendant 1 jours. La figure II.6 illustre les procédures de préparation (traitement mécanique et thermique) de la poudre de coquillage. Le processus de calcination de la poudre de coquillages transforme la poudre de coquilles en une poudre très fine en brisant les liaisons chimiques entre les molécules entre elles. De plus, le processus de calcination de la poudre de coquillages entraîne une destruction de la structure cristalline initiale de la poudre de coquillages par la décomposition des phases carbonate de calcium ($CaCO_3$) en (CaO) comme le montre l'équation suivante:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad \text{Eq :II.1}$$

Les compositions minéralogiques de la PC ont été déterminées par analyse de diffraction des rayons X (DRX) et les résultats obtenus sont présentés dans la figure II.7. Cette analyse X (DRX) montre que, la composition minérale qualitative de la PC est constituée de l'oxide de calcium (CaO) et de l'hydroxide de calcium ($Ca(OH)_2$). L'absence de CaO et de $Ca(OH)_2$ indique que lors de la calcination, la PC est transformée en une phase amorphe potentiellement réactive avec le composant cimentaire. Le tableau II.1 présente les propriétés chimiques et physiques de la PC utilisée. La figure II.8 montre une image observée par un microscope électronique à balayage (MEB) de la PC utilisée. La courbe de l'analyse granulométrique sont présentées également dans la figure. II.2. Les résultats de l'analyse thermogravimétrique et du calorimètre à balayage différentiel (TGA/DSC) sont présentés à la figure II.9. Ils montrent une perte de masse d'environ 40 % correspondant à un pic unique à 650 °C pour la décomposition du $CaCO_3$ en oxyde de calcium et en hydroxyde de calcium (Eq II.1), ce qui indique que la PC est principalement composé de calcite ($CaCO_3$).



***Figure II.6** : Les procédures de préparation de la poudre de coquillage.*

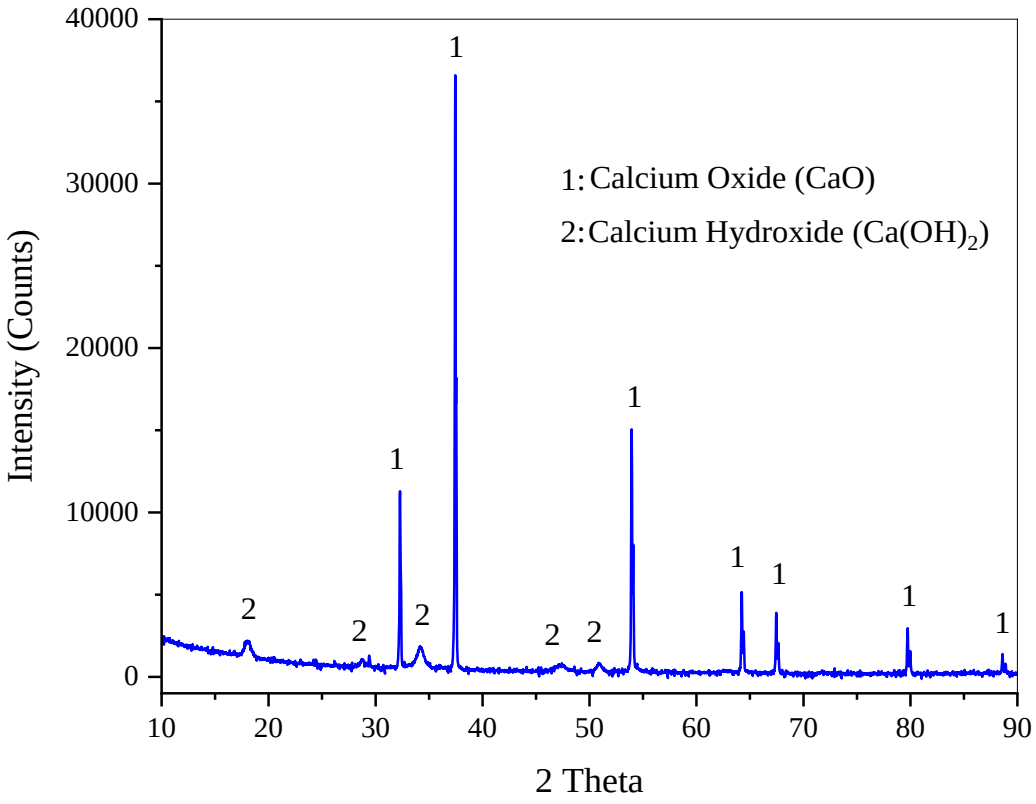


***Figure II.7** : Analyse minéralogique par DRX de la PC.*

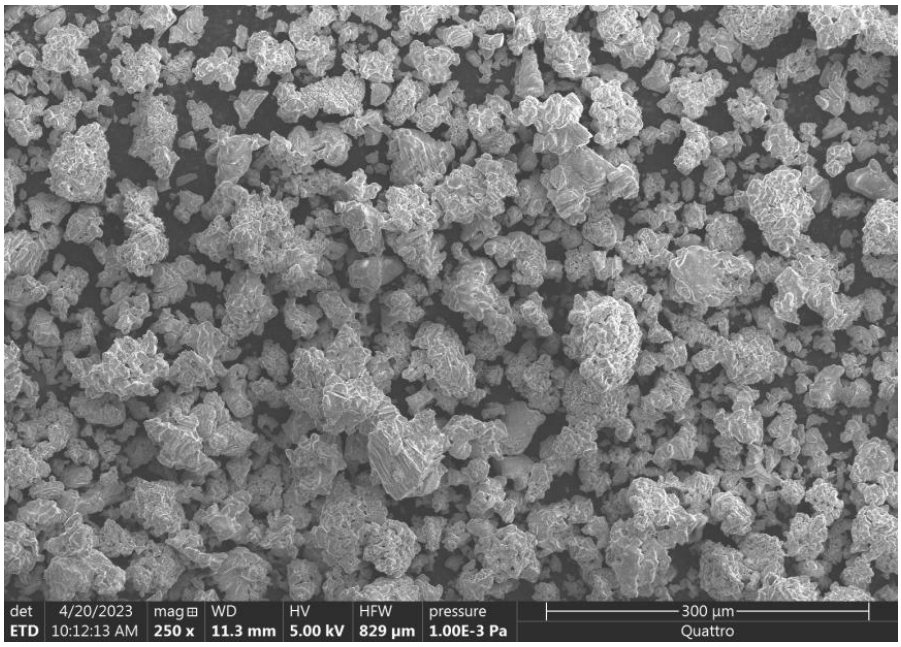


***Figure II.8** : Observation par MEB de la PC.*

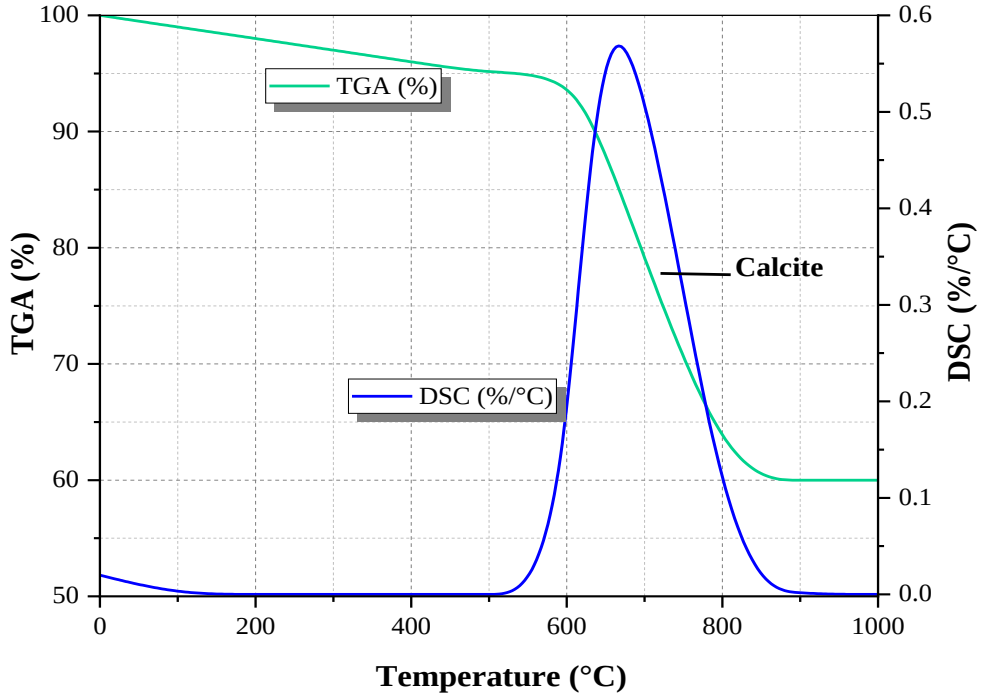


***Figure II.9** : Analyse par TGA/DSC de la PC.*

***Tableau II.1** : Compositions chimiques et propriétés physiques de ciment, PM et PC.*

Éléments (%)	**Cement**	**PM**	**PC**
Propriétés chimiques			
SiO_2	23.83	0.27	0.11
Al_2O_3	6.05	4.39	4.07
Fe_2O_3	4.66	0.12	0. 1
CaO	56.35	94.31	95.06
MgO	2.44	0.56	0.22
K_2O	0.83	-	-
Na_2O	0.58	-	-
SO_3	2.37	0.06	0.11
L.I	2.23	-	-
Cl	-	0.1	0.1
Propriétés physiques			
Densité	3.11	2.73	2.88
Finesse de Blaine (cm^2/g)	3420	2700	8000

II.2.4. Sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel siliceux (SN) de classe granulaire de 0/3 (voir la figure II.10) provenant de la région de la wilaya d'El Oued Souf est située au nord-est du Sahara algérien. L'analyse microscopique par le MEB et la compositions minéralogiques par DRX du SN utilisé sont données aux figures II.11 et II.12 respectivement. La courbe de l'analyse granulométrique de SN et leur caractéristiques physiques et chimiques sont présentées également dans la figure II.13 et le tableau II.2 respectivement.



***Figure II.10** : Aspect général du sable naturel utilisé.*

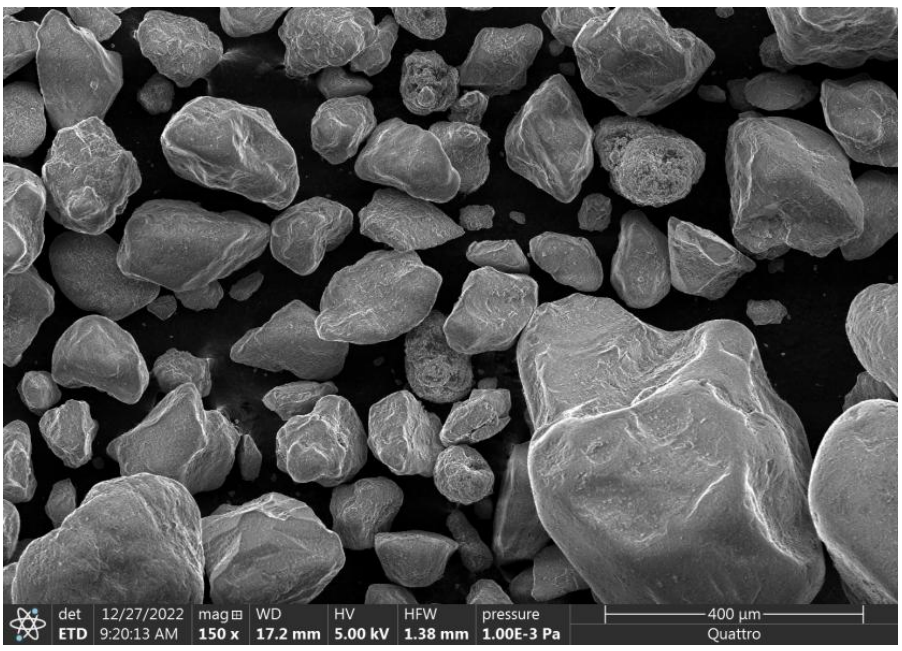


***Figure II.11** : Observation par MEB du sable naturel utilisé.*

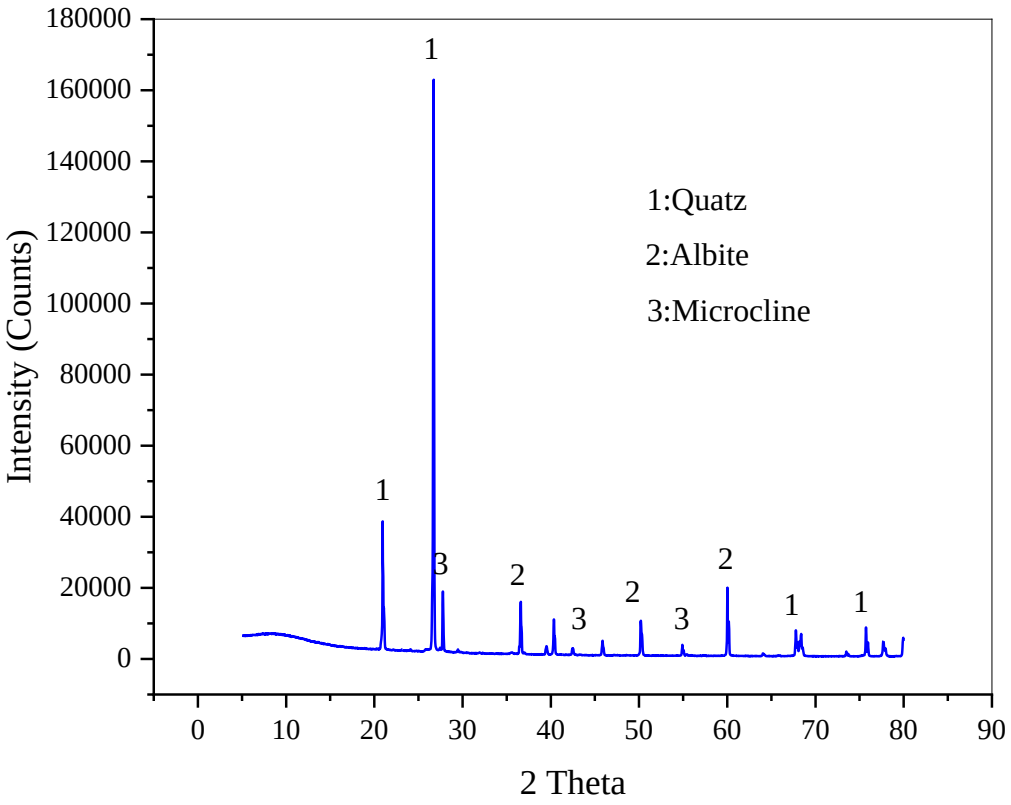


Figure II.12 *: Analyse minéralogique par DRX du sable naturel utilisé.*

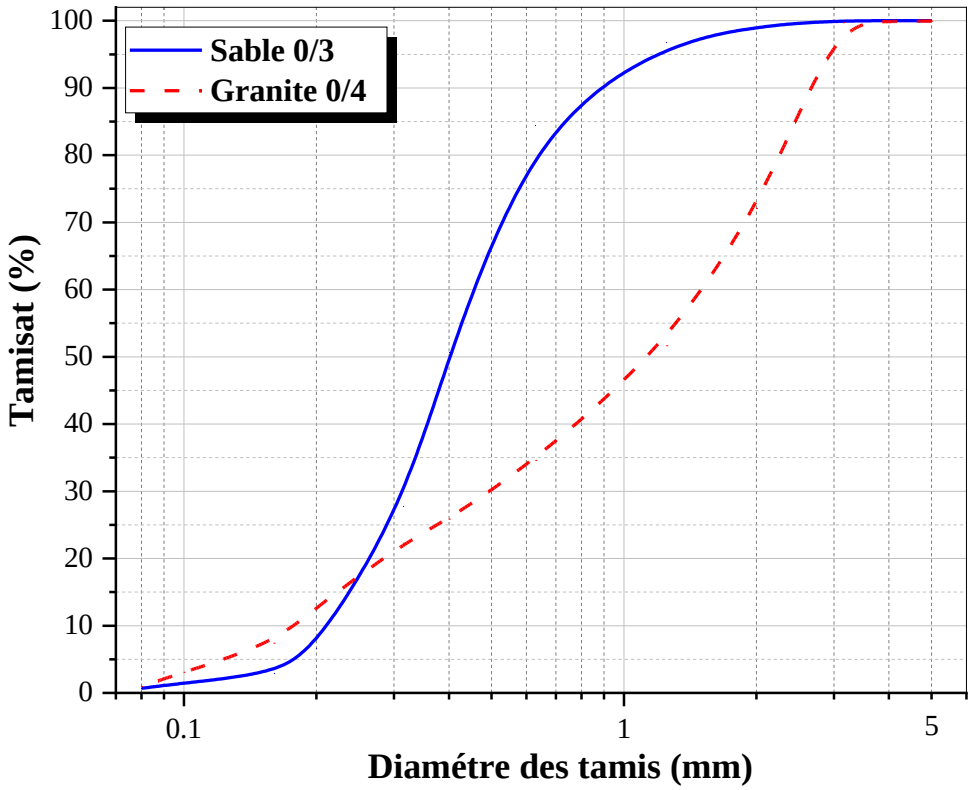


Figure II.13 *: Analyse granulométrique des granulats fin utilisés.*

Tableau II.2 *: Compositions chimiques et propriétés physiques des granulats utilisés.*

Élément (%)	**Sable 0/3**	**Granite 0/4**
Propriétés chimiques		
SiO_2	90.35	51.29
Al_2O_3	4.56	20.47
Fe_2O_3	0.51	12.58
CaO	1.67	11.88
MgO	0.15	5.51
K_2O	1.92	1.47
Na_2O	-	1.36
SO_3	0.7	0.27
L.I	-	-
Cl	-	-
Propriétés physiques		
Provenance	Oued Souf	Médéa
Classe granulaire	0/3	0/4
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.52	1.22
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.63	2.51
Taux d'absorption d'eau (%)	0.96	4.34
Module de finesse	2.33	2.68
Équivalent de sable (%)	82.5	-

II.2.5. Adjuvant

Pour cette étude, l'adjuvant utilisé est un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société algérienne GRANITEX et commercialisé sous l'appellation MEDAFLOW 30 (Figure II.14). Ce SP est un liquide à base de poly carboxylate d'éther caractérisé par une couleur jaunâtre, de pH de 6 et de densité de 1,07 et d'une teneur en chlore < 1g/L. L'extrait sec de cet adjuvant représente 30% de sa masse et sa plage normale d'utilisation est fixée dans sa fiche technique entre 0,5 % et 2 % du poids du ciment.



***Figure II.14** : MEDAFLOW 30.*

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est un eau potable de distribution (du robinet) de notre laboratoire de l'Université de Médéa dont la température est comprise entre 18 et 20 °C et conforme à la norme NF EN 1008.

II.2.7. Déchets de granite

Le sable de granite (SG) utilisé dans cette étude est obtenu à partir d'un concassage et broyage des déchets de granite provenant de la déchèterie des usines de granite et de marbre de la wilaya de Médéa à l'aide d'un concasseur à mâchoires et d'une machine de Los Angeles respectivement, ce qui nous a permis d'obtenir un sable dont les grains ont des dimensions 0/4 mm (figure II.15). La figure II.16 montre la morphologie irrégulière et la forme angulaire des grains de SG observés par MEB. Les propriétés chimiques et physiques du SG et son analyse minéralogique par DRX sont présentées dans le tableau II.2 et la figure II. 17 respectivement.



Figure II.15 *: Les procédures de préparation du SG.*

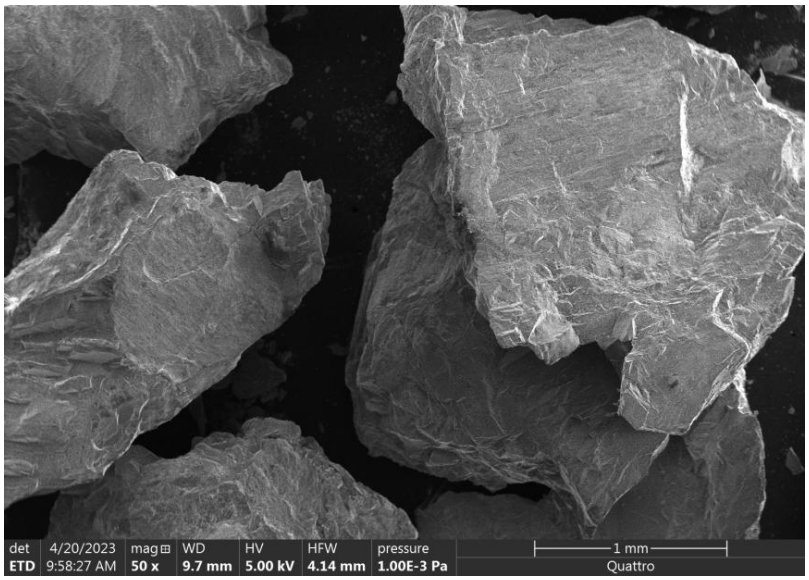


Figure II.16 *: Observation par MEB du SG.*

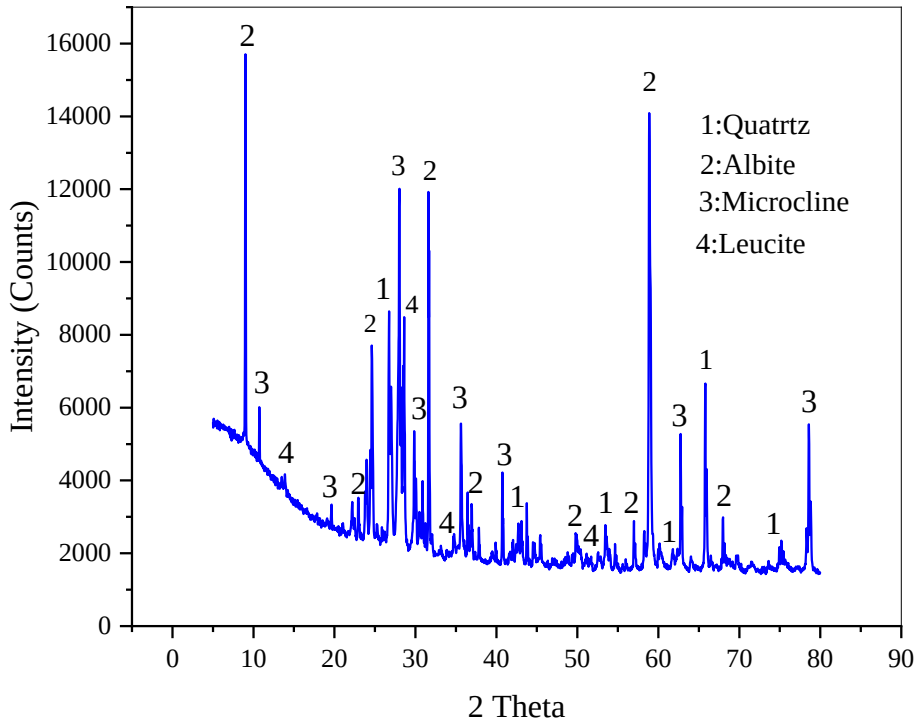


***Figure II.17** : Analyse minéralogique par DRX du SG.*

II.3. FORMULATION

L'objectif de principal de la formulation est d'optimiser la quantité de chaque matériau dans le mélange, afin d'obtenir béton avec les propriétés requises. Le rapport eau/liant (E/L) est le premier facteur pris en compte dans la conception du mélange. Lors de la formulation, il est nécessaire de caractériser le béton de sable fluide (BSF). Il s'agit de comprendre son comportement à l'état frais, à partir des essais réalisés depuis sa mise au point. Il est évident que le béton est qualifié de fluide, non pas en raison de sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : capacité de remplissage et capacité d'écoulement. La formulation du BSF nécessite une étude précise, notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influençant notamment le rapport (E/L) et le dosage en SP. Les principaux tests réalisés pour caractériser le BSF en terme qualitatif de fluidité sont présentés par la suite **[198-199]**.

Dans notre étude, nous nous sommes fixés comme objectif essentiel d'étudier l'influence du PC comme additif cimentaire et du granite (SG) comme granulat fin sur les caractéristiques et les performances du BSF. Pour ce faire, nous avons fixé tous les autres paramètres, c'est-à-dire le rapport (E/L) et nous avons seulement fait varier le pourcentage de SP par rapport à la poudre pour obtenir un BSF avec les propriétés souhaitées.

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la méthode expérimentale du projet national de SABLOCRETE 1994 **[6]** et les formule de base de Mohamed Guendouz **[1]** et de Tayeb Bouziani **[200]**, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité du sable, 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 mini cône et un temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) acceptables **[201]**.

II.3.1.Formulation du BSF

Dans cette étude, le rapport E/C a été fixé à 0,44 et le pourcentage de SP a été varié de 0,75% à 0,8% avec un pas de 0,05%. La sélection du mélange est ajustée par le test d'étalement au mini cône, pour lequel le diamètre de la galette obtenu doit être compris dans la fourchette 270 mm $\leq$ D $\leq$ 320 mm, et par le test de l'entonnoir en V(V-funnel), pour lequel le temps d'écoulement obtenu doit être compris dans la fourchette 2 sec $\leq$ t $\leq$ 10 sec **[202]** . Les différentes compositions adaptées pour les différents BSF sont présentées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 *: Composition des différentes BSF étudiés pour un 1 m^3.*

Mélange	Ciment (kg/m3)	PM (kg/m^3)	PC (kg/m^3)	Sable (kg/m3)	SG (kg/m^3)	SP (%)
Témoin	400.86	201.93	0	1400	0	0.8
5 PC+0 SG	380.82	201.93	20.04	1400	0	0.75
5 PC+10 SG	380.82	201.93	20.04	1266.4	133.6	0.8
5 PC+20 SG	380.82	201.93	20.04	1132.8	267.2	0.8
5 PC+30 SG	380.82	201.93	20.04	999.2	400.8	0.8
5 PC+40 SG	380.82	201.93	20.04	865.6	534.4	0.8
5 PC+50 SG	380.82	201.93	20.04	732	668	0.8
10 PC+0 SG	360.78	201.93	40.08	1400	0	0.75
10 PC+10 SG	360.78	201.93	40.08	1266.4	133.6	0.8
10 PC+20 SG	360.78	201.93	40.08	1132.8	267.2	0.8
10 PC+30 SG	360.78	201.93	40.08	999.2	400.8	0.8
10 PC+40 SG	360.78	201.93	40.08	865.6	534.4	0.8
10 PC+50 SG	360.78	201.93	40.08	732	668	0.8
15 PC+0 SG	340.74	201.93	60.12	1400	0	0.75
15 PC+10 SG	340.74	201.93	60.12	1266.4	133.6	0.8
15 PC+20 SG	340.74	201.93	60.12	1132.8	267.2	0.8
15 PC+30 SG	340.74	201.93	60.12	999.2	400.8	0.8
15 PC+40 SG	340.74	201.93	60.12	865.6	534.4	0.8
15 PC+50 SG	340.74	201.93	60.12	732	668	0.8

II.4. PROCEDURE DE MALAXAGE

La séquence de malaxage du béton joue un rôle important pour assurer une hydratation correcte, ce qui permet d'obtenir un béton performant et durable. Les mélanges de béton de sable fluide ont été réalisés dans un malaxeur de mortier rotatif d'une capacité de 5 litres. Dans les cas particuliers, pour les mélanges de grand volume (éprouvettes cylindriques 16×32 cm), un malaxeur rotatif d'une capacité de 56 litres a été utilisé. En fonction des propriétés souhaitées et des composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences. Dans notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la figure II.18, en suivant les étapes suivantes :

- Mélange à sec le sable et le ciment pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- L'ajout de la première quantité d'eau pendant 1 minute (Eau1 = 70% d'eau);
- L'ajout du reste de l'eau de gâchage (Eau 2 = 30% d'eau) mélangée au superplastifiant pendant 1 minute;
- Arrêt du malaxeur et laisser reposer le mélange pendant 3 minutes;
- Malaxage du mélange de nouveau pendant 1minute ;
- Contrôle visuel de tous signes de ressuage.

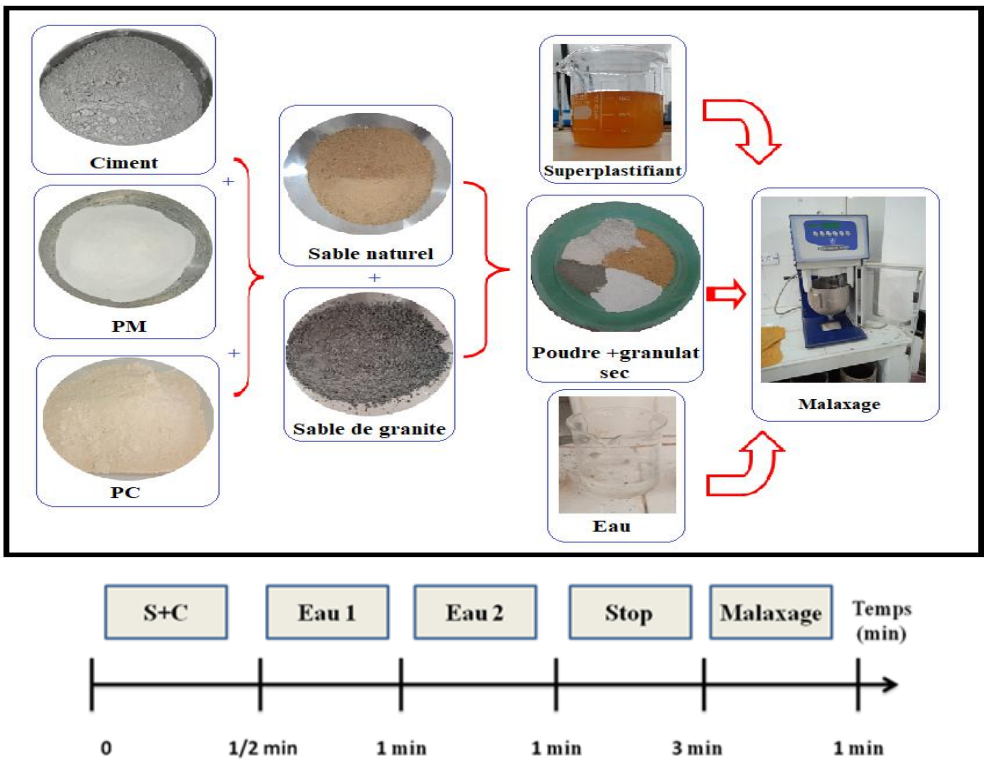


***Figure II.18**: Séquence de malaxage des différents BSF.*

II.5. ESSAIS SUR BSF À L'ÉTAT FRAIS

II.5.1. Essais du temps de prise par Vicat

L'essai du temps de prise effectué à l'aide de l'appareil Vicat permet de mesurer le temps de début et fin de prise (voir la figure II.19) conformément à la norme ASTM C191-82. Pour nos mélanges de BSF, le temps de prise initial et final change en fonction du remplacement du ciment par la poudre de coquillage de 0%, 5%, 10% et 15%.

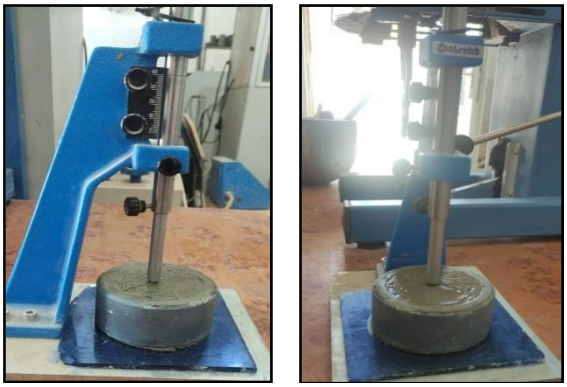


***Figure II.19**: Mesure du temps de pris des mélanges de BSF.*

II.5.2. Essais de l'étalement au Mini-Cône

Conformément à la norme EN 12350-8 **[203]**, le test d'étalement consiste à utiliser un mini-cône (figure II.20). Une fois rempli le cône, on le soulève verticalement, ce qui permet à la pâte de s'étaler sous son propre poids pour former une galette plus ou moins circulaire. L'étalement moyen (D_{moy}) est la moyenne de deux mesures perpendiculaires (D_1 et D_2) comme montré dans la figure II.20.



***Figure II.20**: Mesure d'étalement des mélanges de BSF.*

II.5.3. Essai de l'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel)

Selon la norme EN 12350-9 **[204]**, le test du temps d'écoulement consiste à utiliser un mini-entonnoir en V (V-funnel) comme montré dans la figure II.21. La méthode consiste à remplir un mini-entonnoir en forme de V avec environ 1 litre de BSF tout en maintenant la valve fermée. La valve est alors ouverte, permettant au BSF de s'écouler à travers l'orifice. Le temps d'écoulement t_v est le temps écoulé entre l'ouverture de la valve et le moment où la lumière du jour devient visible au sommet du mini-entonnoir.



***Figure II.21**: Mesure du temps d'écoulement des mélanges de BSF.*

II.6. ESSAIS SUR BSF A L'ÉTAT DURCI

II.6.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme NF EN 196-1 **[205]** par compression axiale sur six morceaux (demi-prismes) de trois éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm qui ont été préalablement écrasées par flexion. Les demi-prismes ont été écrasés à l'âge de 7, 28 et 90 jours de durcissement à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 250 KN comme montre dans la figure II.22.



Figure II.22 *:Diapositif de l'essai de résistance à la compression*.

II.6.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction a été mesurée à l'âge de 7, 28 et 90 jours de durcissement sur trois éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm conformément à la norme EN 196-1**[206]**. L'essai consiste à fendre l'échantillon en deux à l'aide d'une machine hydraulique d'une capacité de 250 KN comme montre dans la figure II.23.



Figure II.23 *:Diapositif de l'essai de résistance à traction par flexion.*

II.6.3. Essai de la vitesse d'auscultation ultrasonique (VAS)

La vitesse de propagation des ondes est mesurée à 7, 28 et 90 jours à l'aide de l'ultrason conformément à la norme ASTM C597-16 **[207]**. L'appareil génère des impulsions ultrasoniques qui traversent l'échantillon de béton à partir d'un transducteur de transmission appliqué sur une surface plane. L'impulsion est captée par un transducteur récepteur également appliqué sur une surface plane opposée et parallèle à la première (Figure II.24).



Figure II.24 *: Mesure de la vitesse d'auscultation ultrasonique.*

Il convient de noter ici que ces surfaces doivent être préalablement lubrifiées avec de la vaseline afin d'assurer une meilleure transmission de l'impulsion. Lorsque l'impulsion est reçue par le récepteur, l'instrument affiche le temps de propagation. Connaissant la distance entre les deux transducteurs, le VAS est donné par la formule suivante :

$$VAS = \frac{L}{t} \qquad \text{Eq :II.2}$$

Où

L :distance entre l'émetteur et le récepteur en (m) ;

t : temps de propagation de l'onde en (s) ;

VAS : la vitesse d'auscultation ultrasonique (m/s).

II.6.4. Module d'élasticité

Selon la norme ASTM C469-14 **[208]**, le module d'élasticité en compression (Ec) a été déterminé à l'âge de 7,28 et 90 jours à l'aide de la cage d'extensométrique comme illustré dans la figure II.25. Cet essai permet de mesurer les déformations longitudinales au cours de l'essai de compression sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 16 x32cm.



Figure II.25 *:Mesure du module d'élasticité.*

II.6.5. Résistance à l'abrasion

L'essai de la résistance à l'abrasion a été réalisé sur des échantillons cubiques de 7x7x7 cm conformément à la norme ASTM C779 **[209]**. Le test a été réalisé à l'âge de 28 jours à l'aide d'une machine d'essai d'abrasion comme décrit dans la figure II.26. Dans le cadre de ce test, le paramètre du coefficient d'abrasion est exprimé en (AC, unité en kg/ m^2).



Figure II.26 *: Diapositif de l'essai de la résistance à l'abrasion.*

La machine comprend un disque en fonte d'un diamètre de 200 mm, qui fonctionne à une vitesse de 30 ± 1 cycles/min. Avant la réalisation de l'essai, les échantillons abrasifs ont été séchés dans un four à 105 °C pendant 24 heures. Pendant l'expérience, 20 g de sable sec ont été utilisés pour le travail d'abrasion. Chaque échantillon cubique a été examiné sur quatre surfaces avec une trajectoire de meulage de 600 m; en détail, chaque surface a été abrasée cinq fois avec une trajectoire de broyage de 150 m. Il a été remarqué que les surfaces abrasées

ont été conduites à partir des quatre faces latérales de l'échantillon. Au début et à la fin de chaque essai d'abrasion, la masse de l'échantillon testé a été mesurée afin de déterminer son pourcentage de perte de masse**[210]**. Le AC est donné par la formule suivante :

$$AC = \frac{m0 - m1}{A} \qquad \text{Eq :II.3}$$

Où

m 0 : la masse de l'échantillon avant l'essai en (kg) ;

m 1 : la masse de l'échantillon après l'essai en (kg);

A : la surface de l'échantillon avant l'essai en (m) ;

AC : le coefficient d'abrasion en (kg/m) .

II.6.6. Essai de la conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise le comportement des matériaux lorsque la chaleur est transférée par conduction. Notée λ, elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre. Elle est exprimée en W/m°C. Cette valeur est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus la valeur est faible, plus le matériau est isolant **[211]**. Selon la norme NF EN 993-15 **[212]**, la conductivité thermique des différents échantillons a été mesurée à l'âge de 28 jours à l'aide d'un CT-mètre sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm (Figure II.27).

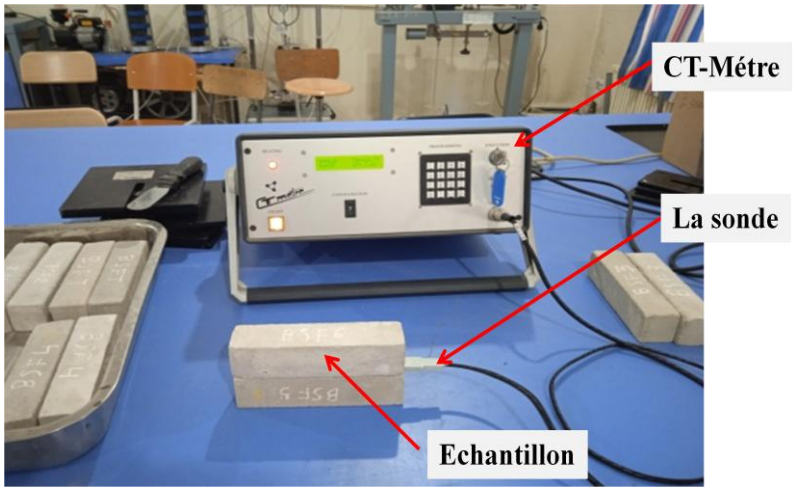


***Figure II.27** : Diapositif de l'essai de la conductivité thermique.*

II.6.7. Résistance à haute température

Conformément à la norme ISO 834 **[213]**, six échantillons de demi-prismes obtenus après l'essai de flexion de trois échantillons de 4 × 4 × 16 cm à 90 jours ont été sélectionnés pour évaluer la résistance au feu. Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 105°C pendant 24 heures pour éliminer toute humidité, puis chauffés dans un four à moufle (Figure II.28) à différentes températures de 400 °C, 600°C et 800°C avec une vitesse de chauffage égale à 10°C/min (Figure II.29) pour assurer des températures constantes dans le four pendant deux heures. Tous les échantillons sont ensuite refroidis à l'air libre pendant 24 heures **[214]**.



***Figure II.28** : Echauffement des échantillons dans un four à moufle.*

Pour chaque température, les mesures de perte de masse (en%) et les résultats de résistance à la compression résiduelle (RCR) ont été évalués à l'aide des relations suivantes :

$$\text{Perte de masse}\,(\%) = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \qquad \text{Eq :II.4}$$

$$\text{RCR}\ (\%) = \frac{RC2}{RC1} \times 100 \qquad \text{Eq :II.5}$$

Où

M1: la masse de l'échantillon avant le chauffage en (kg) ;

M2 : la masse de l'échantillon après le chauffage en (kg);

RCR : la résistance à la compression résiduelle en (%);

RC1 : la résistance à la compression résiduelle de l'échantillon avant le chauffage en (MPa) ;

RC2 : la résistance à la compression résiduelle de l'échantillon après le chauffage en (MPa) .

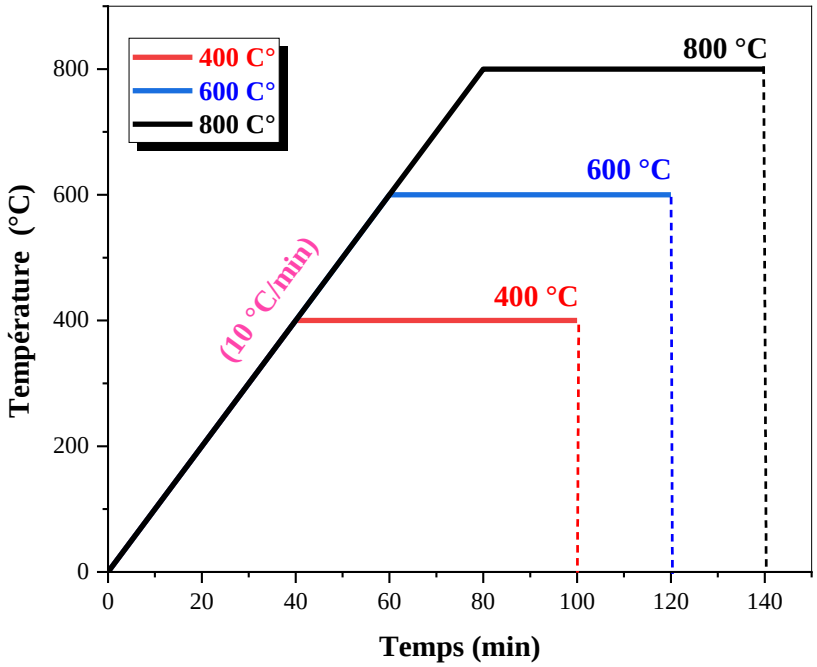


***Figure II.29** : Courbes temps-température pour différentes températures de chauffage.*

II.6.8. Essai de la porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est une propriété importante est considérée comme un indicateur important de durabilité. Selon la norme NF P18-459 **[215]**, trois demi-prismes d'éprouvette de 4x4x16cm sont séchés dans une étuve ventilée à 105 ± 5°C jusqu'à un poids constant, c'est-à-dire la masse sèche (Msec). Après saturation, l'échantillon est pesé sous l'eau (M_{eau}) et à nouveau dans l'air (M_{air}) (Figure II.30). La porosité accessible à l'eau (P) est donnée par l'équation suivante :

$$P\,(\%) = \frac{Mair - Msec}{Mair - Meau} \times 100 \qquad \text{Eq :II.6}$$

Où

M_{air}, M_{sec} et M_{eau} : sont les masses des demi-prismes imbibées pesées dans l'air , sèche et dans l'eau respectivement;

P : la porosité accessible à l'eau en (%).

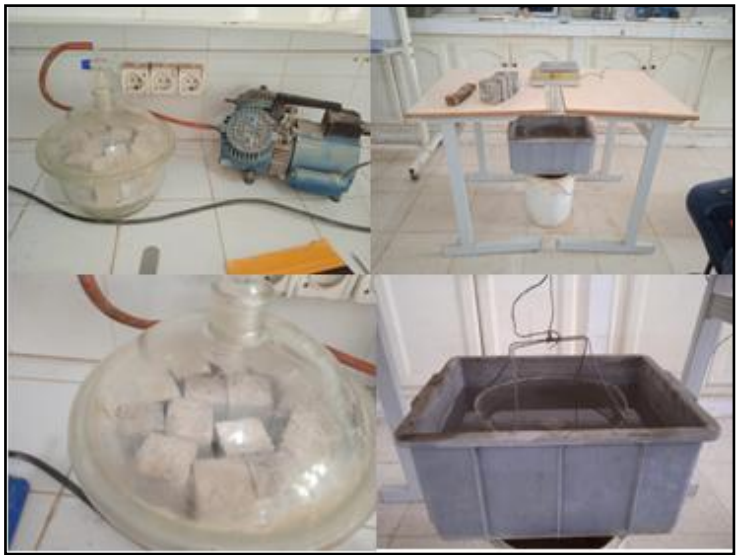


***Figure II.30** : Essai de porosité accessible à l'eau.*

II.6.9. Absorption d'eau par immersion totale

L'essai est effectué conformément à la norme ASTM C642-97 **[216]** sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm. La méthode consiste à sécher des échantillons prismatiques dans une étuve à 105±50°C pendant 72 heures. Les échantillons sont ensuite retirés et laissés à refroidir avant d'être pesés, c'est-à-dire M0.

Les échantillons ont ensuite été immergés totalement dans l'eau à 21°C pendant 72 heures. À la fin de cette période, les éprouvettes ont été retirées et après avoir étoffé les faces par une serviette, ils ont été pesés à nouveau, c'est-à-dire M1. Le taux d'absorption Ab (en %) est déterminé comme suit :

$$\text{Ab}\ (\%) = \frac{M0 - M1}{M0} \times 100 \qquad \text{Eq :II.7}$$

Où

Ab : le taux d'absorption en %;

M0: masse de l'échantillon à l'état saturé en kg ;

M1 : masse de l'échantillon à l'état sec en kg.

II.6.10. Absorption d'eau par capillarité

Selon la norme NF EN 13057 **[217]**, cet essai est réalisé sur des demi-prismes d'éprouvette de 4x4x16 cm pour mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire. Le protocole de ce test consiste à sécher des échantillons (demi-prismes) dans une étuve à 105°C pendant 72 heures jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse constante. Les quatre surfaces latérales des échantillons sont ensuite imperméabilisées à l'aide d'une résine imperméable, afin de garantir que l'eau monte de manière unidirectionnelle par capillarité et d'empêcher l'évaporation latérale de l'eau absorbée au cours de l'essai.

Une fois la résine durcie, l'essai d'absorption capillaire est lancé. Il consiste à contrôler la masse des échantillons partiellement immergés (environ 5 mm) dans un récipient contenant de l'eau potable (figure II.31), M0 étant la masse sec de l'échantillon. Les échantillons sont retirés et pesés régulièrement à l'aide d'une balance de précision, aux moments suivants : 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 6h, 8h et 24h.

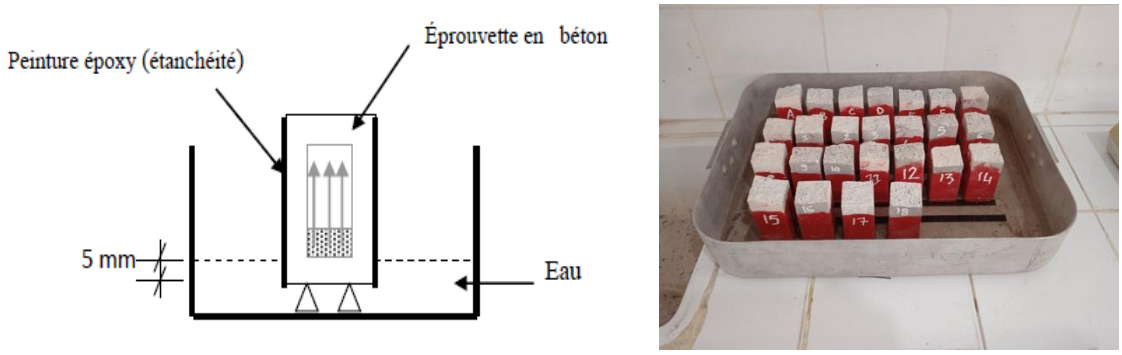


***Figure II.31** : Essai d'absorption d'eau par capillarité.*

II.6.11. Essai de résistances aux cycles gel/dégel

L'essai à examiné l'influence du gel-dégel sur la durabilité du BSF. Des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm ont été exposées à des cycles répétés et continus de 120, 240 et 340 cycles. L'essai de gel-dégel a été réalisé conformément à la norme ASTM C666 **[218]**, sur des éprouvettes à l'âge de 28 jours de la cure à l'aide d'un enceinte de gel-dégel (Figure II.32) à une plage de température de (+9 °C à -18 °C) et selon le cycle de température de congélation-décongélation illustré dans la figure II.33.

L'essai de gel-dégel a été précédé par une saturation des échantillons dans un récipient d'eau de la cure (à 21°C) pendant 72 heures, car le degré de saturation (absorption totale) augmente les dommages internes causés par la congélation du béton d'après des recherches ultérieures **[219, 220]**. Les dommages internes causés par la congélation (gel) des échantillons de BSF ont été évalués en fonction des propriétés physico-mécaniques telles que les observations visuelles, les pertes de masse et de résistance résiduelle à la compression **[221]**.



Figure II.32 *: Essai de résistance aux gel-dégel.*

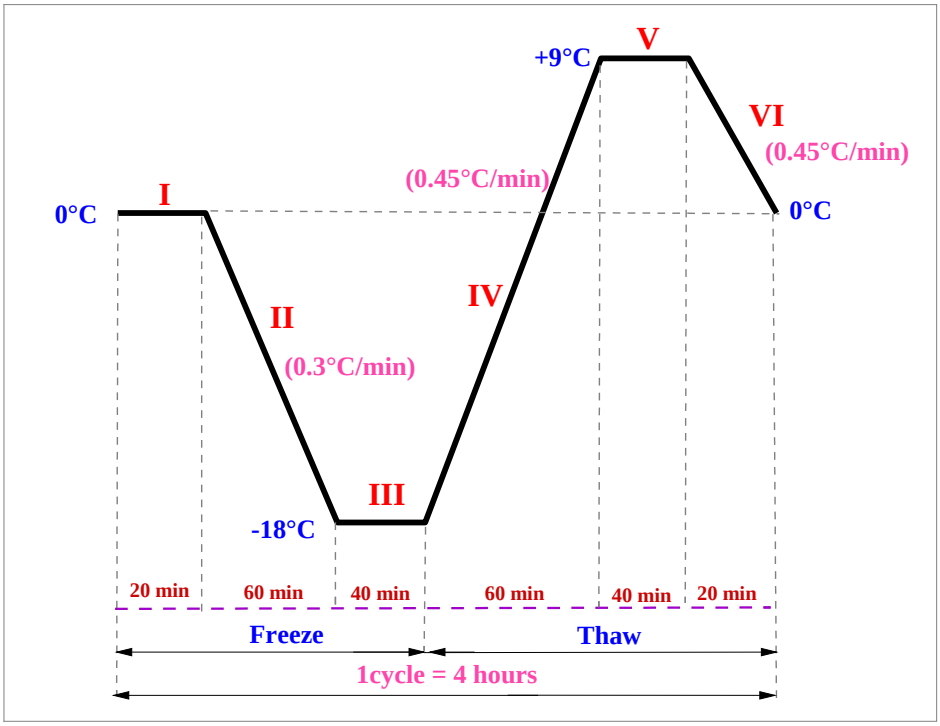


Figure II.33 *: Cycle de température de congélation-décongélation.*

II.6.12. Essai d'attaque par des acides

La résistance due à l'attaque des acides est définie en termes de la durabilité du béton en milieu chimiquement agressif conformément à la norme ASTM C307-03 **[222]**. Après 28 jours de durcissement dans l'eau, des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm ont été immergées dans une solution d'acide chlorhydrique (HCL) à 5 % pendant 180 jours à une température de 23 ±2 C° comme montré dans la figure II.34.La solution d'acide est renouvelée chaque 15 à 20 jours selon la valeur de PH.



Figure II.34 *: BSF immergés dans 5% de HCL.*

Enfin, pour examiner l'effet de l'attaque d'acide chlorhydrique sur les échantillons du BSF, la perte de masse et la résistance résiduelle à la compression de l'échantillon attaqué ont été déterminées à l'aide des formules suivantes:

$$\text{Perte de masse}\,(\%) = \frac{M0 - M1}{M0} \times 100 \qquad \text{Eq :II.8}$$

$$\text{RCR}\ (\%) = \frac{RC1}{RC0} \times 100 \qquad \text{Eq :II. 9}$$

Où

M0 et M1 : les masses des échantillons avant et après immersion dans l'acide, respectivement ;

RC0, RC1 : les résistances à la compression des échantillons avant et après immersion dans l'acide, respectivement .

II.6.13. Essai d'attaque par des sulfates

Pour déterminer la résistance due à l'attaque des sulfates, des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm de tous les mélanges du BSF ont été durcies pendant 28 jours. Ensuite, séchées au four à 105 °C pendant 1 jour. Après le séchage, les éprouvettes ont été immergées dans une solution de sulfate de magnésium$MgSO_4$ à 5 % pendant 180 jours (Figure II.35). Pour chaque 20 jour, la solution de $MgSO_4$ est changée pour assurer la même valeur de PH initiale. Enfin, la résistance due à l'attaque de sulfate de magnésium est examinée par la perte de masse et la perte de la résistance à la compression des éprouvettes ainsi qu'un examen visuel (expansion et fissuration). Les formules suivantes sont utilisées pour déterminer la perte de masse et la résistance résiduelle à la compression:

$$\text{Perte de masse}\,(\%) = \frac{MA - MB}{MA} \times 100 \qquad \text{Eq :II.10}$$

$$\text{RCR}\,(\%) = \frac{RCB}{RCA} \times 100 \qquad \text{Eq :II.11}$$

Où

MA et MB : les masses des échantillons avant et après immersion dans le sulfate, respectivement ;

RCA, RCB : les résistances à la compression des échantillons avant et après immersion dans le sulfate, respectivement .

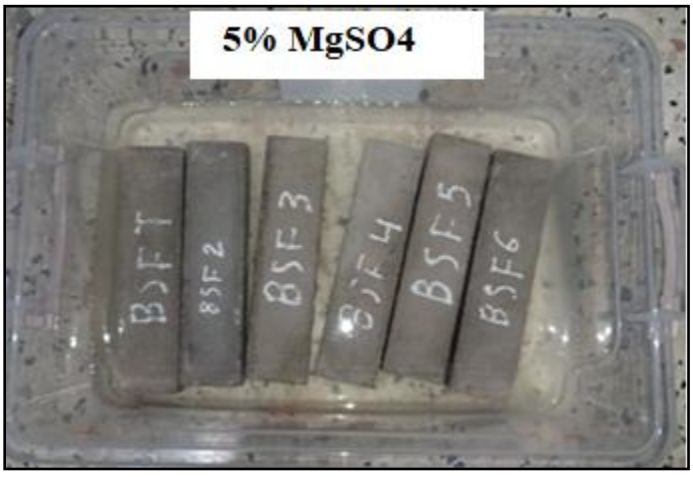


***Figure II.35** : BSF immergés dans 5% de MgSO4.*

II.6.14. Réaction alcali silice

L'essai accéléré de la réaction alcali-silice (RAS) a été réalisé sur des échantillons prismatiques de 4x4x16cmaprès 28 jours de durcissement dans l'eau selon la norme américaine ASTM C 1260 (2007) **[223]**. Les échantillons de prisme ont ensuite été placés dans de l'eau distillée à une température de 80 °C pendant 24 ± 2 heures (la lecture du zéro), puis immergés dans un récipient rempli par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH 1M) à 80°C. L'expansion de l'RAS a été mesurée selon des variations de l'évolution de la longueur des échantillons à l'âge de 4, 7, 14 et 28 jours par un appareil appelé rétractomètre (Figure II.36) .



***Figure II.36** : Mesure de l'expansion des BSF due à l'RAS.*

II.6.15. Essai de la résistivité électrique

La résistivité électrique (RE) des échantillons de béton de sable fluide a été évaluée à l'aide d'un appareil de mesure de la résistivité électrique du béton (CERM) fourni par AIMIL Ltd. L'ERT a d'abord été testée par la méthode uniaxiale à deux points (méthode à deux électrodes) en utilisant des plaques métalliques externes (Figure II.37) et un résistivimètre manuel avec une gamme de fréquences de 0,5 à 10 kHz. Des échantillons de béton de sable fluide d'un diamètre de 10 cm et d'une épaisseur de 5 cm à un âge de 90 jours ont été utilisés conformément à la norme ASTM C 1760 **[224]**, qui est basée sur la loi d'Ohm. Le courant traversant les échantillons suite à l'application d'une différence de potentiel est mesuré. La formule suivante est utilisée pour déterminer la résistivité électrique :

$$\text{Résistivité électrique (K}\Omega\text{.cm)} = R\frac{A}{l} \qquad \text{Eq :II.12}$$

Où

R = Résistance électrique, A= est la surface des échantillons de béton, l= est la hauteur des échantillons de béton.

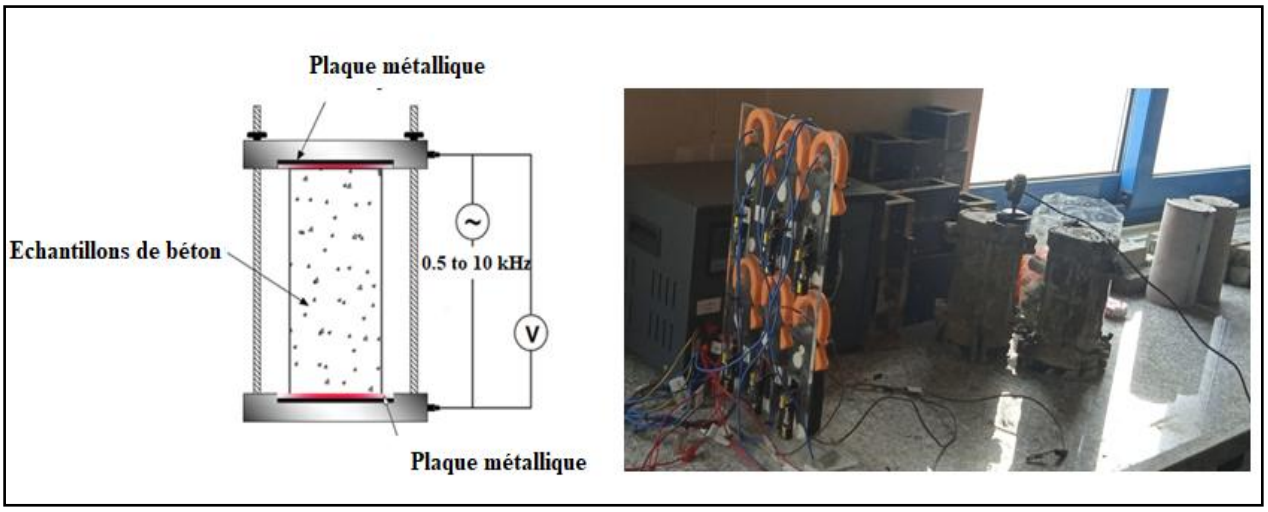


***Figure II.37** : Essai de la résistivité électrique.*

II.6.16. Essai de perméabilité aux ions chlorures

L'essai de perméabilité aux ions chlorures a été réalisé conformément à la norme ASTM C-1202 **[225]**. Ce test consiste à mesurer l'intensité du courant passé généré par une différence de potentiel égale de 60 volts maintenue constante pendant 6 heures au moyen d'électrodes en cuivre inoxydable entre les deux cellules à deux compartiments. Une face des échantillons est en contact avec une solution de chlorure de sodium (NaCl) concentrée à 3% (compartiment amont : cathode) et l'autre face est en contact avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) concentrée à 0.3% (compartiment aval : anode). Les électrodes immergées dans chaque compartiment sont constituées d'une maille métallique. Les échantillons cylindriques du béton de sable fluide d'un diamètre de 10 cm et d'une épaisseur de 5 cm sont obtenus en découpant des éprouvettes de 10 cm × 20 cm à l'aide d'une scie à béton. Avant chaque essai, les échantillons sont soumis à une saturation en eau après avoir été vidés de toute la surface à l'intérieur des échantillons à l'aide d'une pompe à vide. La quantité de charge

passée dans les échantillons placés dans des cellules a été déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$Q\,(\text{Coulombs}) = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + ... + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \qquad \text{Eq :II. 13}$$

Où

Q= charge transmise en coulombs, I= courant transmis en ampères pour les abréviations de temps 0, 30, 60, 90....600 en minutes.

L'équipement nécessaire pour l'essai de la perméabilité aux ions chlorure est représenté dans la figure II.38.La classification de l'évaluation de la performance du béton en fonction de la quantité de la perméabilité aux ions chlorure est affichée dans le tableau II.4

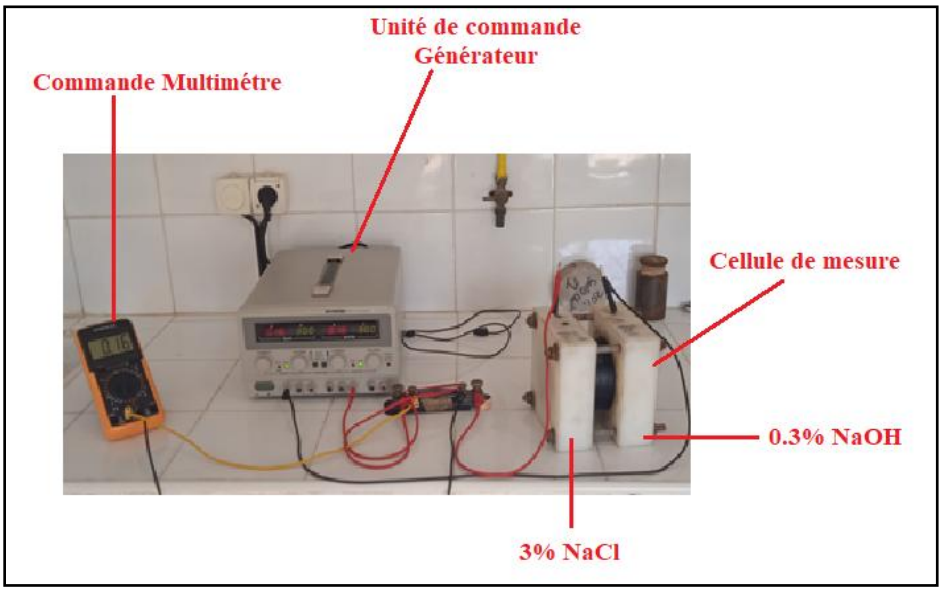


***Figure II.38**: Essai de perméabilité aux ions chlorures.*

***Tableau II.4** : Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorures.*

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

II.6.17. Essais d'analyses microstructurales

Pour déterminer la morphologie et les propriétés minéralogiques des différents mélanges de béton de sable fluide, une analyse microstructurale utilisant la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX) et thermogravimétrique (ATG/ATD) a été réalisée.

II.6.17.1. Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

La microstructure des déférents mélanges du BSF durcis a été effectuée par une analyse de microscopie électronique à balayage (MEB) par l'instrument VEGA3–SEM TESCAN avec une tension d'accélération de 25 kV (Figure II.39). Les analyses de MEB ont été réalisées sur des échantillons de dimension de 10 à 20 mm et à l'âge de 28jours de conservation.



Figure II.39 *: Microscope Electronique à Balayage (MEB).*

II.6.17.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Les propriétés minéralogiques des mélanges de béton de sable fluide ont été identifiées à l'aide de la technique d'analyse par diffraction des rayons X (XRD) par l'instrument BRUKER BRUXER, Axs D8 ADVANCE A8 (Figure II.40). Un petit échantillon de béton de 28 jours a été prélevé sur l'échantillon coulé et réduit en poudre après avoir été chauffé à 105 ± 5°C pendant 24 heures. Cette poudre a ensuite été placée dans un filtre en fibre de verre. Des rayons X ont été générés dans un tube cathodique du matériau cible Cu. Les résultats de ce test montrent les intensités relatives des pics correspondant aux différents éléments et à la composition de l'échantillon.



Figure II.40 *: Essai de diffraction des rayons X (XRD).*

II.6.17.3. Analyse thermogravimétrique (ATG/ATD)

L'analyse thermogravimétrique (ATG/ATD) a été réalisée pour examiner les produits d'hydratation en observant les changements dans les BSF durcis à l'aide de de l'instrument SHIMADZU DTG-60/60H pour des échantillons pesant environ 10 mg. Les échantillons testés proviennent des mêmes échantillons que ceux préparés pour le test DRX. Le degré d'hydratation est estimé en déterminant la perte de masse due à la décomposition du carbonate de calcium ($CaCO_3$), de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) à des températures comprises entre 100 et 900 °C à partir des courbes ATG et ATD, respectivement.

II.7. CONCLUSION

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux locaux disponibles sur le marché algérien pour la fabrication du BSF. Notre objectif principal est d'étudier l'effet combiné du coquillage comme additif au ciment et des déchets de granite usagés comme granulat fin sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du BSF. Pour ce faire, le coquillage a été substitué au ciment et le sable a été substitué par les granulat de granite recyclé. Cette partie de recherche a abordé successivement les points suivants :

- Les matériaux utilisé pour la préparation des BSF avec leur caractérisation physique et chimique ;
- La méthode de formulation du BSF utilisée, dite méthode expérimentale de SABLOCRETE. L'objectif principal de cette méthode est d'optimiser les dosages du ciment, du superplastifiant et du sable ;
- Pour formuler le BSF, des essais à l'état frais ont été effectués pour optimiser le dosage en superplastifiant;
- D'abord, des essais effectués au cours de cette étude pour déterminer leurs propriétés rhéologiques sont l'essai de temps de prise par Vicat, l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai du temps d'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel);
- Des essais à l'état durci sont effectués pour examiner l'influence combinée de la poudre de coquillage et le sable de granite sur les performances physico-mécanique et de la durabilité en termes de : la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la vitesse ultrasonique, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, la conductivité thermique, la résistance aux hautes températures, la porosité, l'absorption d'eau, la résistance aux cycles de gel-dégel, la résistance aux attaques des acides et de sulfatas ainsi que la résistance aux réactions alcalin silice ;
- Enfin, des caractérisations microstructurales par MEB, DRX et ATD/ATG ont été réalisées pour analyser l'effet du SG et PC sur le développement microstructure des différents BSF.

CHAPITRE III

COMPORTEMENT DES BSF À

L'ÉTAT FRAIS

CHAPITRE III

COMPORTEMENT DES BSF À L'ÉTAT FRAIS

III.1. INTRODUCTION

Afin d'étudier les propriétés rhéologiques des bétons de sable fluide à base de la poudre de coquillage et de granulats fins de granite, notre recherche est divisée en deux principales parties:

- La première partie consiste à réaliser des essais sur des béton de sable fluide afin d'optimiser le rapport superplastifiant sur liant (SP/L);

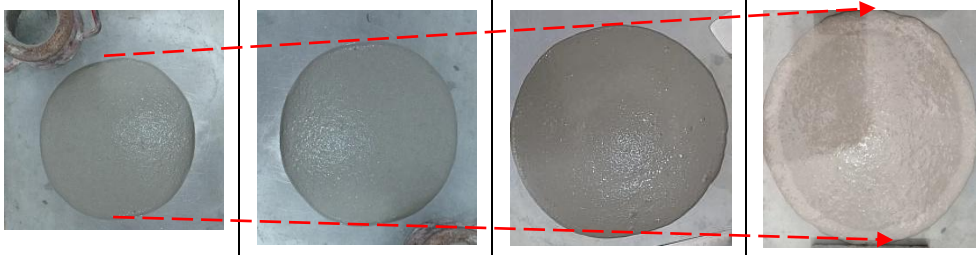
- La deuxième partie est consacrée à déterminer les propriétés rhéologiques des bétons de sable fluide. On passera ensuite à l'interprétation et à la discussion des résultats issus des essais tels que le temps de prise, l'étalement et le temps d'écoulement.

III.2. FORMULATION DES BSF

III.2.1. Optimisation du rapport SP/L

Pour l'optimisation de la formulation du béton de sable fluide de référence, nous utilisé la méthode expérimentale du projet national de SABLOCRETE 1994 **[6]**. Le rapport SP/L est optimisé pour obtenir un béton de sable fluide de forte fluidité avec un étalement entre 270 et 320 mm, un temps d'écoulement varie entre 2 et 10 secs et un béton sans ressuage (évalué visuellement).L'optimisation du dosage en SP permet de développer les meilleures propriétés du béton de sable fluide à l'état frais pour assurer des meilleures performances à l'état durci. Dans cette étude, nous testons quatre formulations de béton de sable fluide contenant quatre différents dosages de SP, et nous varions le dosage du SP de 0,7% à 0,85 % avec un pas de 0,05% et un rapport E/C fixé à 0,44. Les résultats obtenus des essais d'étalement et le temps d'écoulement pour le dosage de SP optimal sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 *: Résultats d'étalement du BSFT pour différents % de SP.*

BSFT formulés				
Mélanges	**$BSFT_1$**	**$BSFT_2$**	**$BSFT_3$**	**$BSFT_4$**
E/C	**0.44**	**0.44**	**0.44**	**0.44**
SP %	**0.7**	**0.75**	**0.8**	**0.85**
Étalement (mm)	240 < 270	258 < 270	**306.4** > 270	327 > 320
Temps d'écoulement (s)	9.02 < 10	7.14 < 10	**3.9** > 2	2.19 > 2
Observation	Mélange ferme + Ségrégation	Mélange ferme + homogène	**Mélange fluide + sans ressuage + homogène**	Mélange fluide + ressuage + non homogène
Examen visuel				

D'après les résultats illustrés dans le tableau ci-dessus, on remarque que plus on augmente le dosage en SP, plus la fluidité est augmentée, pour un pourcentage de SP de 0,7 % avec un diamètre d'étalement de 240 mm. Une augmentation du pourcentage de SP de 0,05% mène à une augmentation de 38 mm de diamètre du BSF. Pour un dosage de SP de 0,8%, le béton de sable fluide présente la meilleure fluidité avec un étalement de 306,4 mm. Avec l'utilisation des matériaux locaux algériens, un dosage optimal de SP de 0,8 est le dosage adéquat pour obtenir des bétons de sable très fluides, homogènes et de grande capacité de passage dans les zones les plus encombrées.

III.2.2. Effet du dosage en superplastifiant sur les BSF

III.2.2.1. Étalement au mini-cône

L'influence du dosage en SP sur les résultats du test de l'étalement des BSF est présentée dans les figures III.1, III.2 et III.3. D'après ces figures, les valeurs du diamètre de l'étalement en fonction du dosage en SP pour tous les mélanges de BSF choisis varient entre 270 et 320 mm, et sont acceptables selon les recommandations de Domone et Jin **[226]**, tous les mélanges de BSF examinés représenteront des mélanges sans ressuage.

L'effet du SG sur le dosage de SP est illustré à la figure III.1. Cette figure montre que les dosages de SP augmentent avec l'augmentation du SG pour obtenir la même valeur d'étalement sans ressuage. À titre d'exemple, pour le mélange à 10% de SG, on constate que le dosage de SP est de 0,85%, qui s'augmente par 0,35 % avec 50% de SG. En outre, le dosage de SP égal à 1 % avec le mélange comprenant 50% de SG a été rejeté, car il a donné des mélanges fermes. Cette diminution des valeurs de l'étalement est due à la surface rugueuse, la texture et forme anguleuse des particules de SG, ainsi qu'au leur fort taux d'absorption d'eau et la forte cohésion entre les particules de granite et la pâte cimentaire **[227]**. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés dans d'autres recherches **[227-229]**.

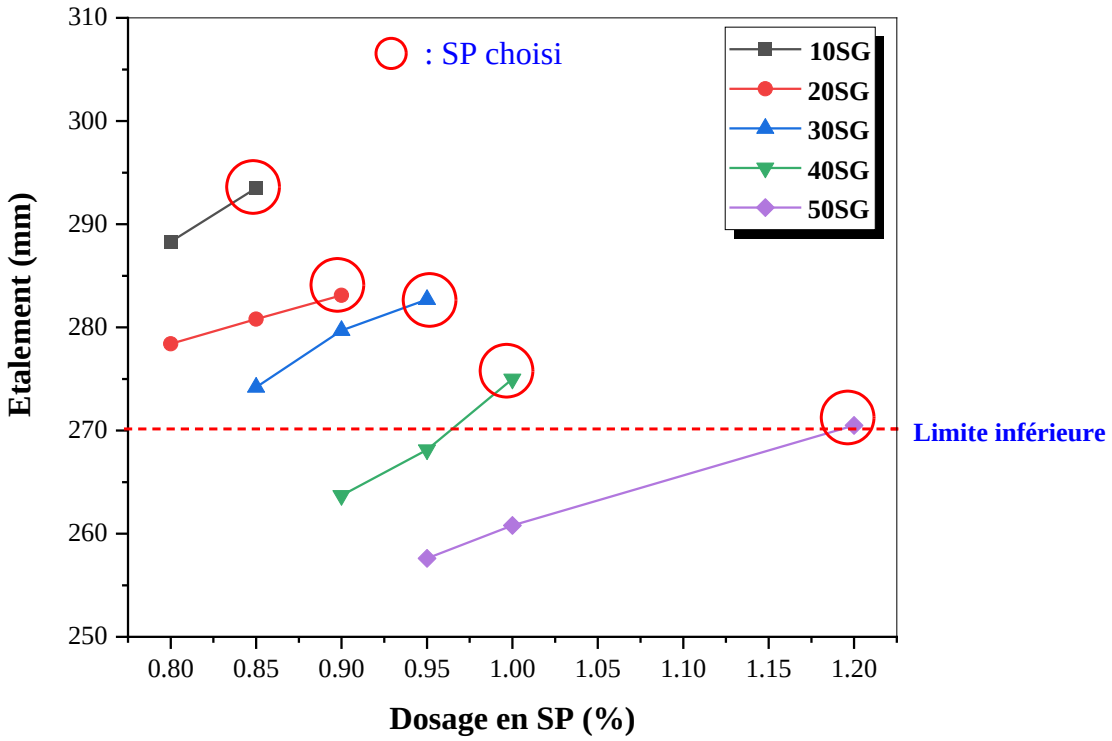


Figure III.1 *:Étalement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG.*

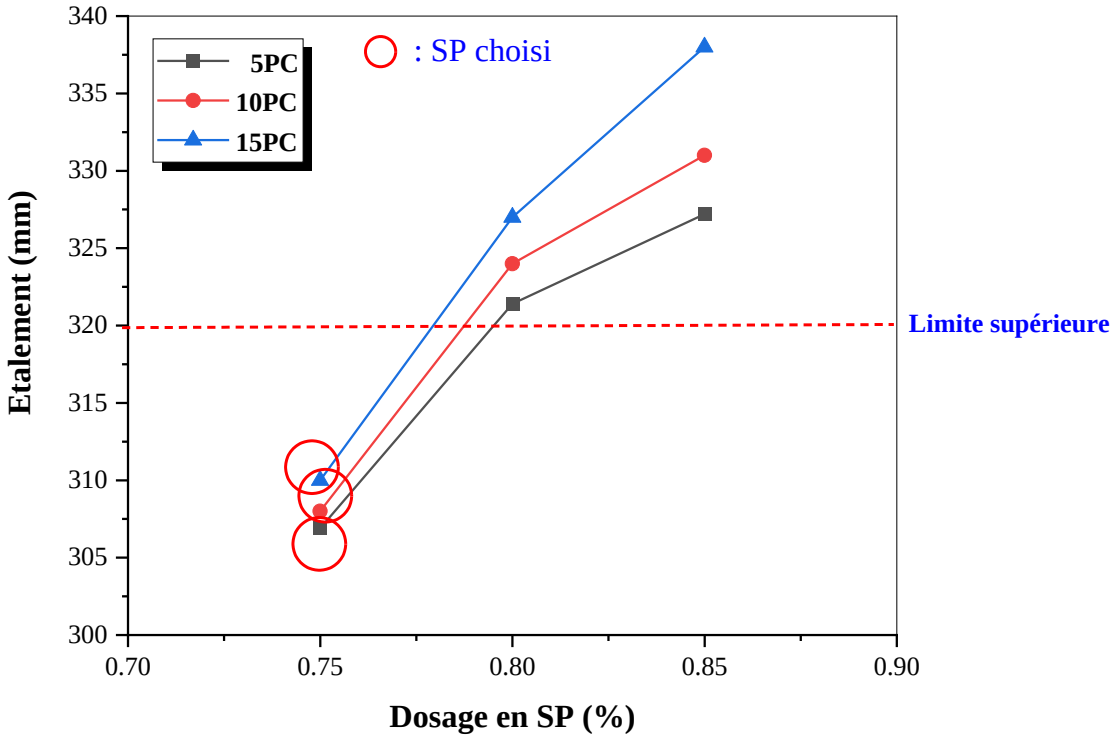


Figure III.2 *: Étalement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de PC.*

Par contre, avec l'incorporation de PC, on a remarqué une augmentation de la fluidité d'après la figure III.2. Donc, il est nécessaire de réduire le dosage en SP pour obtenir une fluidité au moins du même intervalle qu'au mélange de référence (BSFT).Ces résultats montrent que l'augmentation de la PC entraîne une diminution des dosages en SP, ce qui confirme les résultat de d'autres chercheurs **[230, 231]**. En outre, pour les mélanges de BSF élaborés avec la combinaison de la PC et SG, on a constaté que la présence de PC dans les mélanges avec SG a également augmenté la fluidité et a aussi réduit le dosage de SP (voir la figure III.3), et donne un béton de sable fluide homogène.

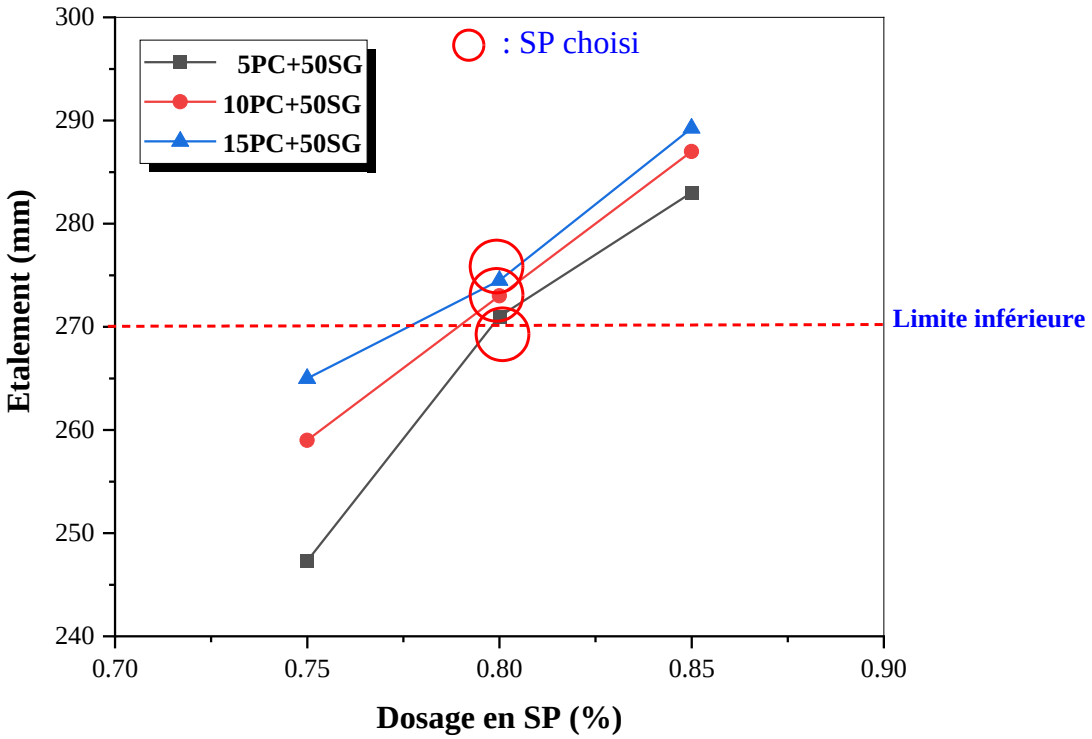


Figure III.3 *: Étalement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG et PC.*

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure qu'il est possible de réduire l'utilisation de SP (dosage en SP) et/ou le besoin en eau des BSF fabriqués avec PC pour obtenir une fluidité comparable à celle des BSFT. Cela permet de réduire le coût de fabrication des BSF en diminuant la consommation de ciment et en valorisant les déchets de coquillage.

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

Les résultats des temps d'écoulement en V-funnel pour tous les mélanges du BSF obtenus sont présentés dans les figures III.4, III.5 et III.6. On remarque que le dosage de saturation en SP qui donne des valeurs du temps d'écoulement en V-funnel dans la fourchette de 2 à 10 secondes recommandée par EFNARC **[232]** ,est de l'ordre de 0.75 à 0.85%. La figure III.4 représente l'influence du SP sur le temps d'écoulement de BSF avec le SG. D'après cette figure, on remarque une diminution du temps d'écoulement en V-funnel avec l'augmentation de dosage en SP. Les mélanges du BSF avec 50% de SG nécessitent un dosage plus élevé de SP, alors que le dosage de 1.2% a donné des temps d'écoulement compris entre 4 et 10 secs. Pour des dosages en SP inférieurs à 1,2%, on remarque que les mélanges du BSF sont caractérisés par des valeurs de temps d'écoulement plus élevées qui sont supérieures à 10 secondes. L'introduction du SG a augmenté le temps d'écoulement par rapport aux mélanges du BSF avec PC, et augmenté le dosage en SP pour satisfaire le caractère fluide du béton. Pour des pourcentages élevés en SG, les BSF consomment plus de SP que les mélanges de BSF composés du ciment et de la PC seuls. La substitution de PC dans les mélanges avec le SG surtout avec des pourcentages importants, a minimisé l'effet négatif du SG sur le temps d'écoulement et, par conséquent, la viscosité des mélanges (voir la figure III.5).

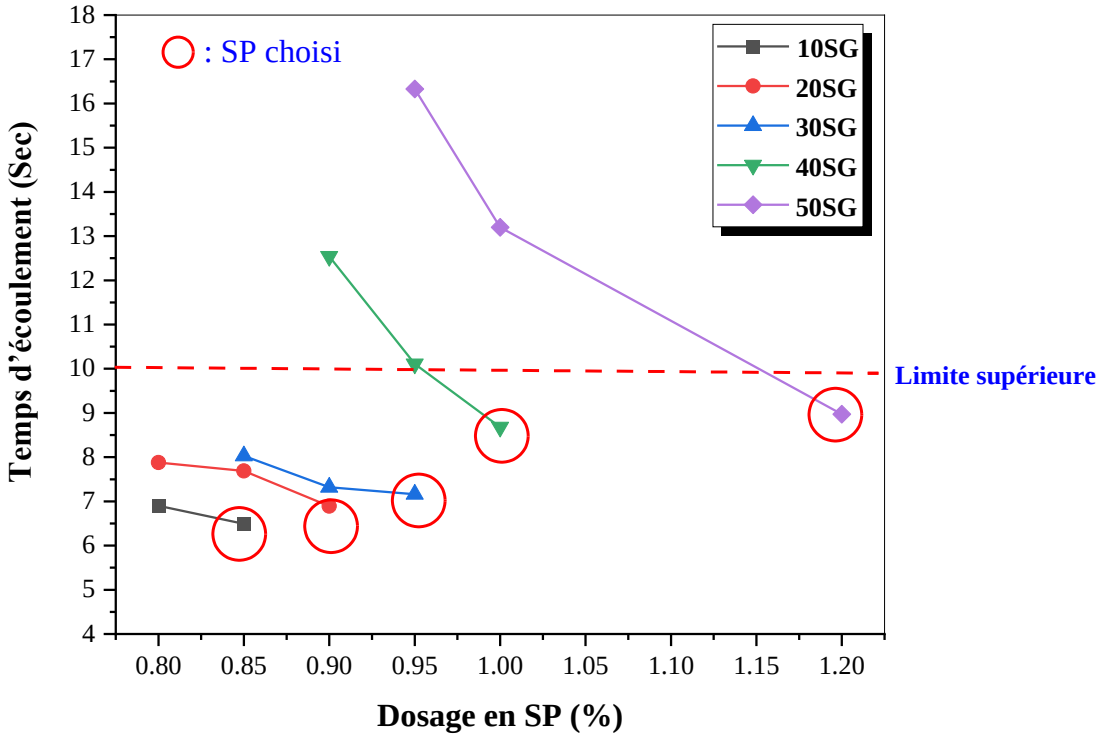


Figure III.4 *: Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG.*

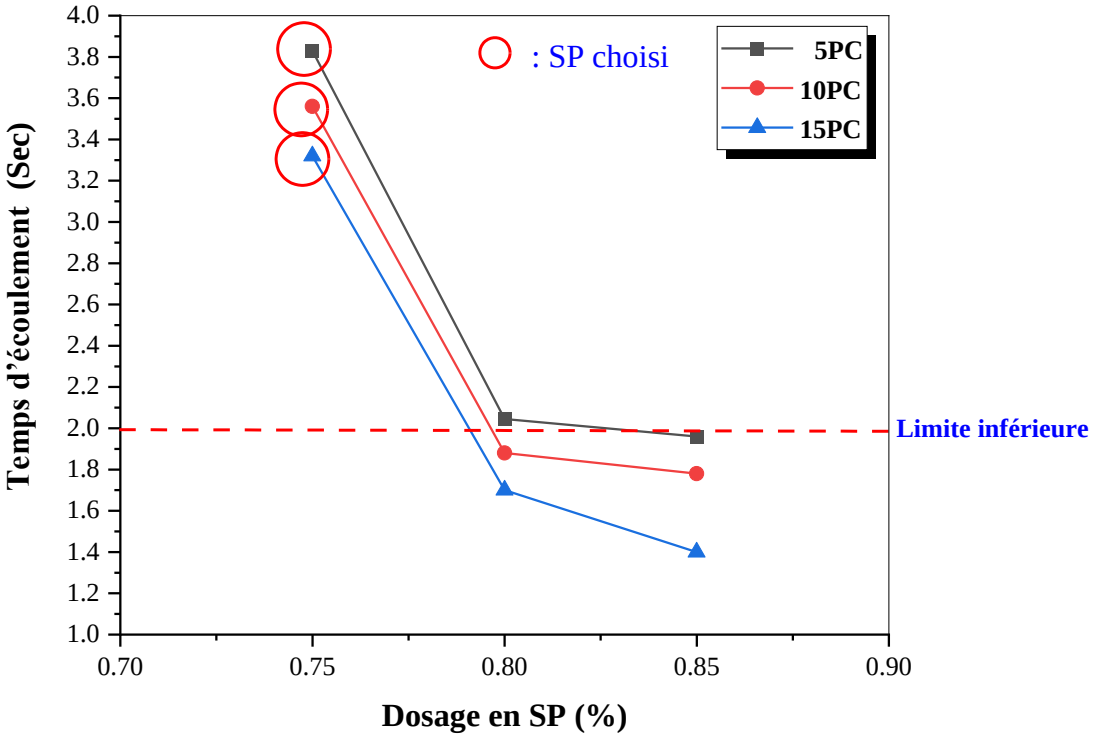


Figure III.5 *: Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de PC.*

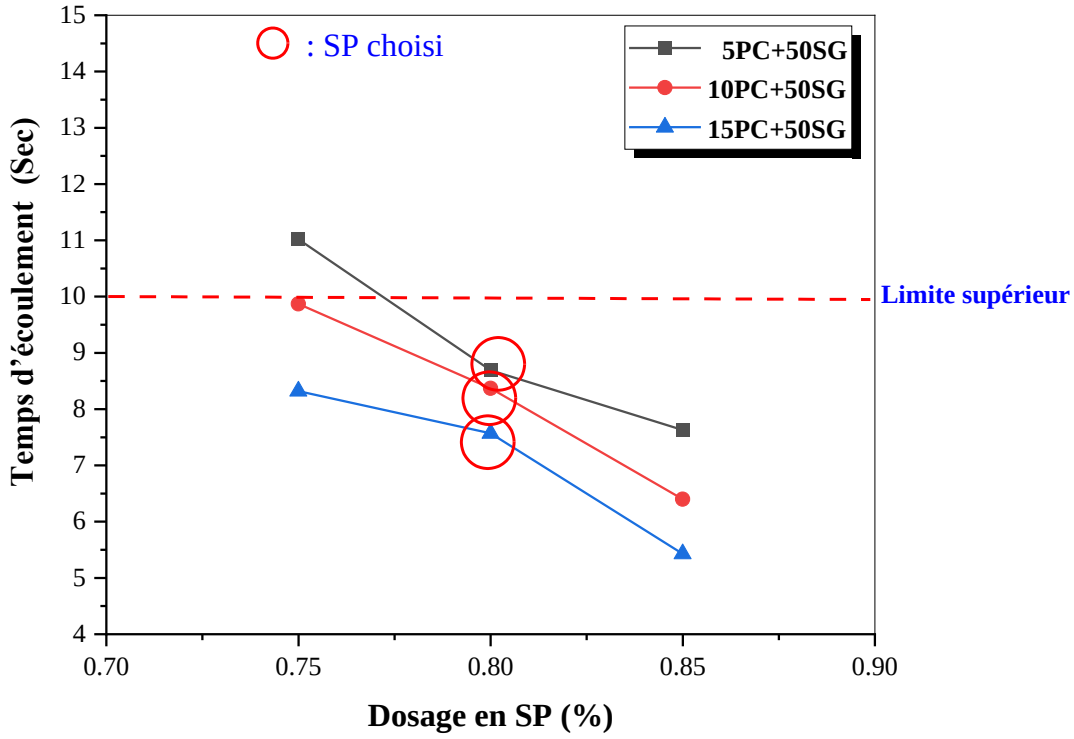


Figure III.6 *: Temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les BSF à base de SG et PC.*

En conséquence, l'utilisation de la PC affaiblie le dosage en SP par sa nature (composition chimique) et sa morphologie et sa texture, qui se caractérise par une demande en SP inférieure à celle du ciment. La demande en SP de SG, et en particulier pour un fort dosage selon sa forme angulaire et un fort taux d'absorption, est la plus importante de tous les mélanges du BSF. L'incorporation de PC a permis de réduire la demande du dosage en SP dans les mélanges du BSF (figure III.6).

III. 3. Effet de PC et du SG sur la fluidité des BSF

III. 3.1. Effets de PC sur le temps de prise au Vicat

La figure III.7 montre les résultats des temps de prise initial et final pour des différents mélanges de coulis de ciment contenant 0 %, 5 %, 10 % et 15 % de PC. La figure III.7 montre que tous les mélanges répondent aux normes ASTM C191-82. En outre, il est observé que les temps de prise initial et final s'allongent avec l'augmentation du remplacement du ciment par la PC. Cette augmentation des temps de prise initiale et finale des mélanges peut s'expliquer par la réaction retardée du PC avec l'eau. Il est reconnu que la proportion plus élevée d'oxyde de calcium (CaO) dans les coquillages (la composition principale des coquillages), due à l'effet de la dilution du PC dans la matrice cimentaire, pourrait retarder les temps de prise. Le mélange de coulis de cimentavec15% de PC a rapporté des temps de prise initial et final de 157 min et 197 min respectivement, ce qui représente les temps les plus longs de tous les mélanges. Il est donc possible d'utiliser le PC comme retardateur de prise pour les bétons, ce qui est un avantage dans les climats chauds et pour les bétons transportés.

À titre d'exemple, le mélange de coulis de ciment de control (0% PC) et le mélange du coulis de ciment contenant 5% de PC ont montré des valeurs inférieures du temps de prise (initial et final) qui sont bien inférieures à 139 et 177 minutes, respectivement. Cette constatation est cohérente avec celle de Tayeh et al. **[32]**. Pour les autres coulis de ciment avec au-delà de 5% de PC, ils ont montré des résultats de temps de prise plus élevés dans la plage de 142 à 172 minutes. Joseph Jean et al. **[233]** ont rapporté que les valeurs du temps de prise augmentaient à mesure que la quantité de PC augmentait.

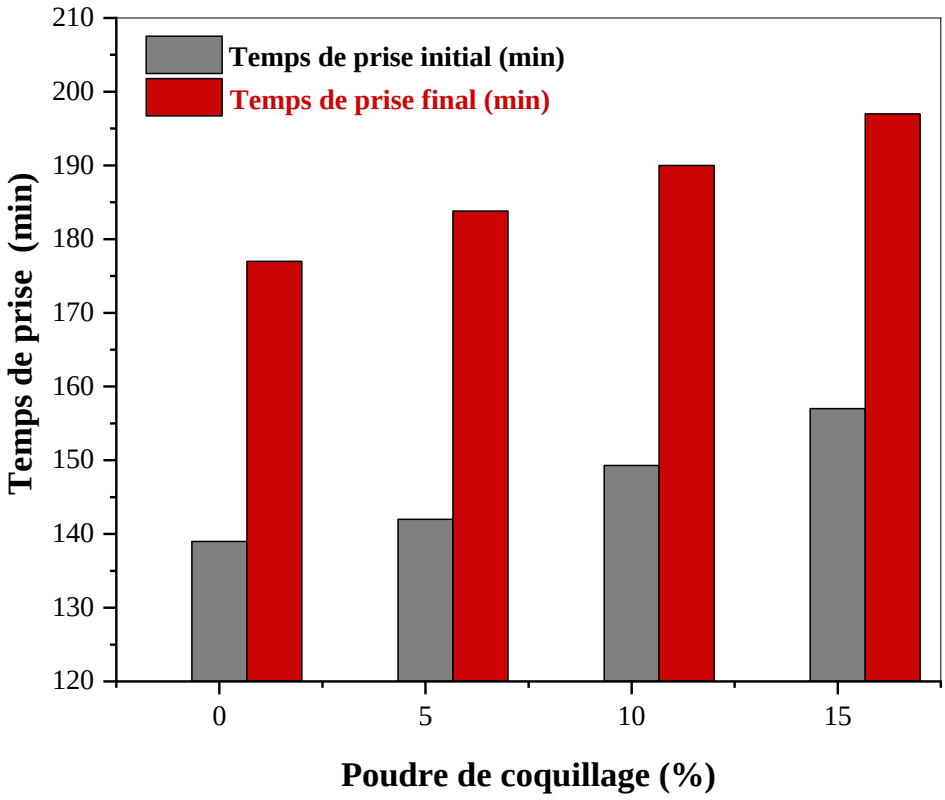


***Figure III.7** : Évolution du temps de prise en fonction de la substitution de PC.*

III. 3.2. Étalement au mini-cône

Les résultats de la variation des valeurs de l'étalement au mini-cône des mélanges de BSF en fonction de la teneur en PC et SG, sont représentés sur la figure III.8. Comme le montre cette figure, les valeurs de l'étalement étaient varient entre 270 et 320 mm, dans l'intervalle recommandé par Domone et Jin **[226]**. Ce qui indique une bonne déformabilité des mélanges de BSF conformément aux recommandations de l'EFNARC **[232]**. Elles représentent donc la capacité d'écoulement du BSF sans ségrégation et ressuage. Cependant, les résultats indiquent que l'accroissement du taux de substitution de PC de 5 à 15% augmente le diamètre de l'étalement par rapport au BSF de contrôle. Cette augmentation avec 15% de PC est tout à fait remarquable. L'augmentation du diamètre de l'étalement due à l'hydratation du PC pendant un temps plus long que l'hydratation du ciment peut conduire à un allongement du temps de prise initial, laissant une quantité d'eau libre et améliorant la fluidité des mélanges du BSF. D'autres études ont montré des résultats similaires **[234, 235]**.

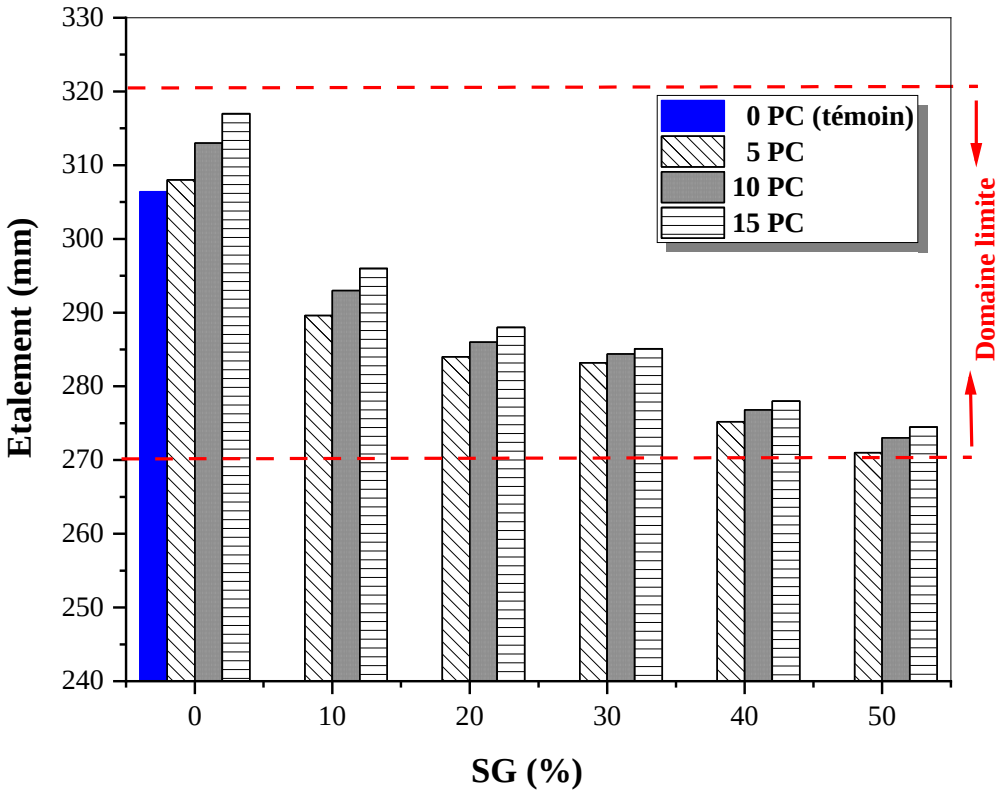


***Figure III.8** : Variation de l'étalement des BSF à base de la PC et SG.*

En outre, une diminution de l'étalement est observée dans les mélanges BSF incluant SG, ce qui indique une diminution de la fluidité, en particulier ceux avec 50% de SG, grâce à l'effet synergique de SG et PC. Cette diminution peut être due à la forme angulaire et au fort taux d'absorption d'eau des particules de SG par rapport au sable naturel. On peut conclure que la combinaison de SG et de PC a eu un impact positif sur le diamètre de l'étalement en donnant des résultats acceptables sur la déformabilité des mélanges BSF. L'utilisation de ces deux matériaux en combinaison a été trouvée bénéfique, car elle permet d'atténuer l'effet négatif de l'utilisation du SG avec le sable naturel sur la déformabilité des BSF, sur tout à des pourcentages de 40% et 50% de SG. Abhishek Jain et al. **[138]** ont étudié l'efficacité de l'utilisation de déchet de granite recyclé sous forme de sable dans les mélanges de BAP. Les résultats obtenus montrent que les propriétés de la fluidité ont été diminuées à mesure que les déchets de granite étaient incorporés en grandes quantités dans le mélange. Abhishek Jain et al. **[138]** ont montré queles propriétés à l'état frais (étalement) ont été diminuées pour tous les mélanges de BAP à mesure que la substitution de déchets de granite augmente, se sont révélés être dans les limites satisfaisantes selon la norme EFNARC **[232]**, à l'exception du mélange préparé avec 100% de déchets de granite.

III. 3.3. Temps d'écoulement en mini- entonnoir en V (V-funnel)

La figure III.9 présente la variation des résultats du temps d'écoulement pour l'essai en mini-entonnoir en V (V-funnel) des différents mélanges de BSF étudiés. D'après les résultats présents dans cette figure, les valeurs du temps d'écoulement de tous les mélanges de BSF étaient acceptables et stables parce que leur valeur est inférieure recommandée par l'EFNARC **[232]**, ce qui montre des bons paramètres de viscosités et de résistances à la ségrégation. On peut remarquer d'après la figure III.9 que l'ajout de PC a diminué le temps d'écoulement (viscosité) des BSF en comparaison au BSFT, mais avec des valeurs de temps d'écoulement enregistrées qui répondent toujours aux propriétés des BSF avec un dosage en SP constant. On peut noter que, même avec l'ajout des pourcentages modérés en PC, les valeurs du temps d'écoulement montrent que la substitution de PC réduit la viscosité des BSF, et ceci est dû à l'augmentation du temps de l'hydratation du PC que l'hydratation de ciment. Les mélanges contenant des PC ont nécessité une faible quantité d'eau et/ou de superplastifiants par rapport à celle du mélange de contrôle (BSFT) pour avoir la viscosité souhaitée **[226]**. À titre d'exemple, le mélange du BSF fabriqué à base de 15% de PC ont montré la valeur inférieure du temps d'écoulement qui est bien inférieure à 4 s, montrant la viscosité la plus faible.

De plus, le temps d'écoulement augmente à mesure que l'incorporation de SG à la place du sable naturel augmente. Le temps d'écoulement le plus long de valeur a été obtenu lorsque 50% de SG ont été ajoutés à tous les mélanges de BSF. La réduction du temps d'écoulement peut être attribuée à la morphologie angulaire et à la texture rugueuse des particules du SG, à la cohésion interne des particules granulaires et ainsi l'augmentation des forces de frottement entre les différentes particules granulaires du mélange. Abhishek Jainet al. **[138]** ont étudié l'effet du SG sur les propriétés rhéologiques du BAP et ils ont montré que le temps d'écoulement augmente à mesure que le pourcentage de SG augmente.

La figure III.10 montre une bonne relation (corrélation linéaire) entre le temps d'écoulement en mini-entonnoir en V et l'étalement au mini-cône avec un coefficient de corrélation acceptable (R^2=0,95),ce qui montre que le temps d'écoulement est lié directement au diamètre d'étalement.

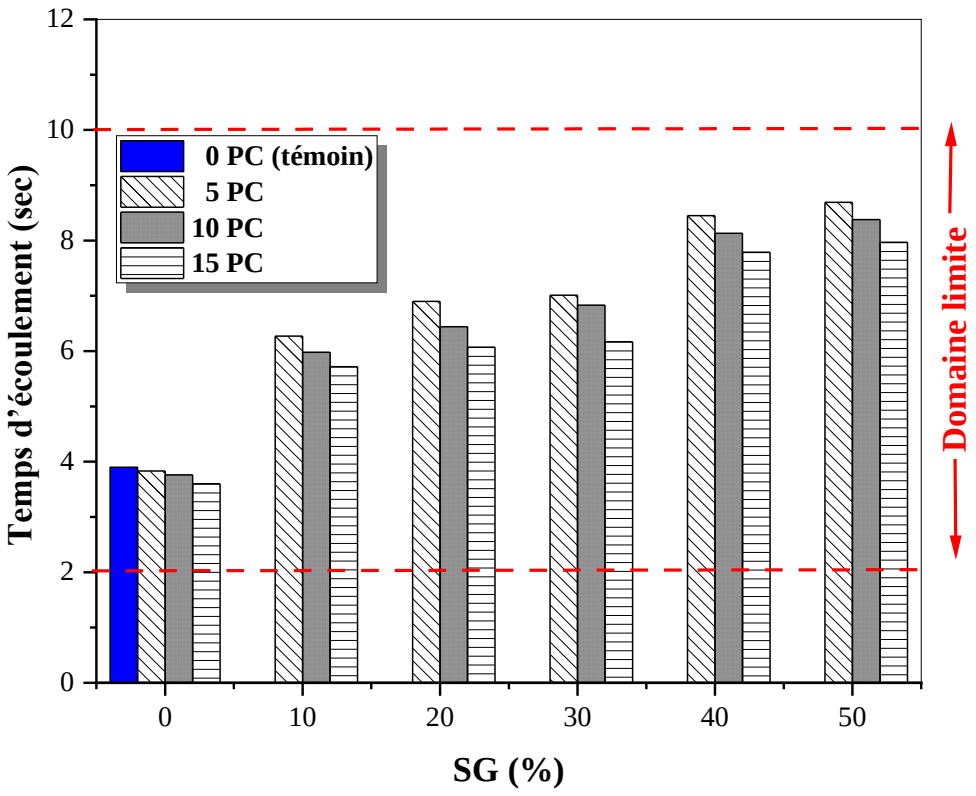


Figure III.9 *: Variation du temps d'écoulement des BSF à base de PC et SG.*

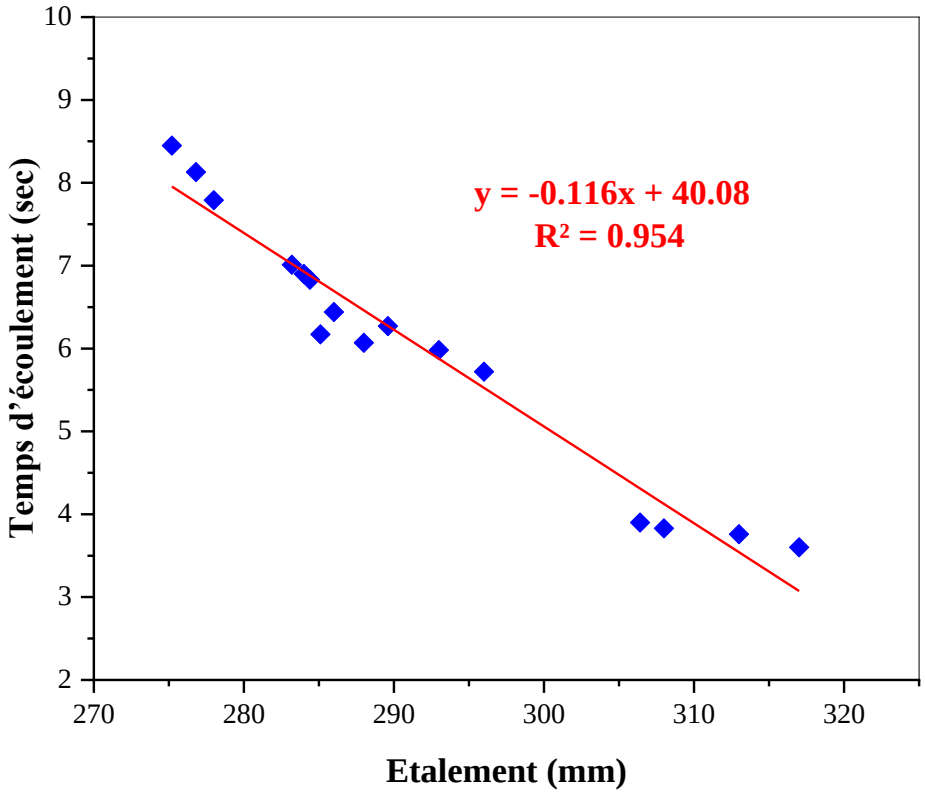


Figure III.10 *: Corrélation entre l'étalement et le temps d'écoulement des BSF.*

Pour résumer tous les résultats de l'effet de PC et du SG sur la fluidité des BSF, les principaux effets constatés suite aux essais de l'étalement au mini-cône et le temps d'écoulement en mini-entonnoir en V sur les BSF aux états frais sont présentés dans le tableau III.2 suivant :

***Tableau III.2** : Principaux effets* constaté *suite aux essais sur BSF aux états frais.*

Mélanges	**Fluidité**		**Viscosité**		**Demande en SP**	
	Effet	Optimum	Effet	Optimum	Effet	Optimum
Témoin	-	-	-	-	-	-
5PC+0SG	↑↑↑	•	↑↑↑	•	↑↑↑-SP	•
5PC+10SG	↓↓↓		↓↓↓		↓↓↓	
5PC+20SG	↓		↓		↓↓↓	
5PC+30SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
5PC+40SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
5PC+50SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
10PC+0SG	↑↑↑	•	↑↑↑	•	↑↑↑-SP	•
10PC+10SG	↓↓↓		↓↓↓		↓↓↓	
10PC+20SG	↓		↓		↓↓↓	
10PC+30SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
10PC+40SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
10PC+50SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
15PC+0SG	↑↑↑	••	↑↑↑	••	↑↑↑-SP	••
15PC+10SG	↓↓↓		↓↓↓		↓↓↓	
15PC+20SG	↓		↓		↓↓↓	
15PC+30SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
15PC+40SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	
15PC+50SG	↓↓		↓↓		↓↓↓	

NOTES :

- Effet positif pour la fluidité et la viscosité, ↑ Faible, ↑↑ Moyen, ↑↑↑ Bon.
- Effet négatif pour la fluidité et la viscosité, ↓ Faible, ↓↓Moyen, ↓↓↓ Mauvais.
- Effet négatif pour la demande en SP, ↓Faible , ↓↓Moyen, ↓↓↓Mauvais.
- Effet positif pour la demande en SP, ↑ Faible, ↑↑Moyen, ↑↑↑ Bon.
- - SP : Dosage réductionnel en superplastifiant .
- • : Optimum choisi.
- • •: Optimum^{+} choisi.

III.4. CONCLUSION

Cette partie récapitule les principaux résultats des essais rhéologiques. L'objectif consistait à étudier l'effet de l'ajout de PC et du SG sur le comportement rhéologique des BSF. En ce qui concerne l'étude des propriétés rhéologiques des BSF en fonction de la teneur en PC et SG. Les résultats de cette partie montrent que l'augmentation du dosage en PC démunie la demande en SP des mélanges pour avoir les propriétés autoplaçantes des BSF. De plus, une augmentation de l'étalement est obtenue pour les mélanges avec la PC seule. Par contre, une diminution des propriétés précédentes a été obtenue avec l'incorporation de SG. Les mêmes constatations ont été enregistrées par le temps d'écoulement. À ce stade, les résultats d'ouvrabilité entre l'étalement et le temps d'écoulement présentent une bonne corrélation.

Les résultats ont permis de conclure que la poudre de coquillage et le sable de granite pouvaient être utilisés dans les formulations des BSF avec optimisation de la teneur en sable et/ou en SP. Jusqu'à un pourcentage de 50% du SG peut être utilisées dans les compositions des BSF avec différentes teneurs en PC, les caractéristiques rhéologiques sont acceptables et répondent aux recommandations de l'EFNARC.

Grâce à l'effet synergique de la combinaison de SG et de PC dans les mélanges des BSF, elle offre un avantage économique et technique en termes de réduction du coût des BSF par la réduction de l'utilisation du SP.

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT DES BSF À

L'ÉTAT DURCI

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT DES BSF À L'ÉTAT DURCI

IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons exposer et analyser les résultats des différents essais effectués à l'état durci sur le béton de sable fluide à base de la poudre de coquillage comme ajout cimentaire et du sable de granite, et on essaye de comparer nos résultats avec les résultats d'autres chercheurs existant dans la bibliographie ainsi, on envisagera à mettre en évidence les caractéristiques physico-mécanique de durabilité des bétons de sable fluide étudiés sur la base d'essais couvrant les différents mécanismes (résistance à la compression, résistance à la flexion, vitesse d'auscultation sonique, module d'élasticité, résistance à l'abrasion, la résistivité électrique, la conductivité thermique, porosité accessible à l'eau, l'absorption, résistance à haut température, résistance au gel/dégel, réaction alcali silice, pénétration aux ions chlorures, résistance au acide et résistance au sulfate). L'ensemble de ses caractéristiques sont caractérisables d'après les propriétés structural (microstructure) du béton de sable fluide, par lesquelles les substances agressives sont véhiculées. De ce fait, optimiser les propriété physico-mécanique du béton c'est accroitre la durée de vie du matériau exposé a plusieurs conditions agressives. Le chapitre se termine par une étude sur l'impact environnemental (émission de CO_2 et consommation d'énergie).

IV.2. EFFET DE SG ET LA PC SUR LE COMPORTEMENT DES BSF À L'ETAT DURCI

IV.2.1. Résistance à la compression

La figure IV.1 (a, b et c) représente la variation de résultats de la résistance à la compression des différents mélanges des BSF à l'âge de 3, 7, 28 et 90 jours de durcissement. La figure montre une augmentation remarquable des valeurs de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de PC. Au-delà de 15% du contenu en PC, il y a eu une perte de valeurs de la résistance à la compression à tous les âges de durcissement par rapport aux mélanges avec 5% et 10% du PC. La résistance à la compression à 7 jours du BSFT (0SG + 0PC) est de 25.21 MPa, ce qui augmente avec la substitution de PC à 26.82 MPa. 27.19

MPa et 25.96 MPa pour les mélanges de BSF fabriqués avec 5%, 10% et 15% de PC respectivement. La résistance à la compression à 28 jours des mêmes mélanges BSF augmente de 31.27 MPa à 37.42 MPa, 39.16 MPa et 34.89 MPa, ce qui représente une augmentations de la résistance de 16.43%, 20.14% et 10.37 %, respectivement, par rapport au BSF témoin. De même, la résistance à la compression à 90 jours de ces mélanges passe de 39,97 MPa à 41,17 MPa, 44,93 MPa et 40,57 MPa, soit des augmentations de la résistance de 2,91 %, 11,03 % et 1,47 %, respectivement, par rapport au BSF témoin. Cette amélioration de la résistance avec l'ajout de PC à 28 et 90 jours s'explique par la réaction pouzzolanique avec $Ca(OH)_2$ à long terme. La résistance résultante a été obtenue grâce à la réaction pouzzolanique et à la production de composés carbonatés **[236]**.

Les résultats obtenus ont montré que l'élimination du $Ca(OH)_2$ et l'augmentation de C-S-H par la réaction pouzzolanique sont les clés pour améliorer la résistance à la compression du BSF. Indépendamment des temps de durcissement, les résultats ont montré aussi que la résistance optimale à la compression se développait avec une quantité optimale de 10 % de PC. En revanche, la réaction de PC a amélioré la résistance à la compression en raison de l'effet pouzzolanique et du remplissage dans les pores. Cependant, la résistance diminuait pour un niveau de substitution de plus de 10%, mais restait supérieure à celle du mélange de référence. Cette diminution de la résistance à la compression avec 15 % de PC peut être due à la forte concentration de CaO dans la PC qui pourrait réagir avec le gypse et Al_2O_3, réduisant ainsi l'hydratation précoce de l'alite **[237-241]**. En plus, l'augmentation de la substitution élevée en PC (au-delà de 10%) réduira la quantité des produits de clinker dans le ciment, qui provoquera une diminution de la résistance.

De plus, la figure IV.1 montre que l'ajout de SG augmente la résistance à la compression de tous les mélanges du BSF. La résistance à la compression des mélanges BSF à l'âge de 90 jours passe de 39,97 MPa à 63,22 MPa, 66,51 MPa et 61,91 MPa pour les mélanges 5PC + 50SG, 10PC + 50SG et 15PC + 50SG, soit une amélioration de 36,77 %, 39,93 % et 35,43 % par rapport au mélange témoin (BSFT). Cette amélioration de la résistance à la compression peut être attribuée au PC qui remplit les pores et, d'autre part, à la forme angulaire et à la rugosité de la surface des particules de SG qui améliore la zone de transition entre la pâte cimentaire et les particules de SG **[242]**.

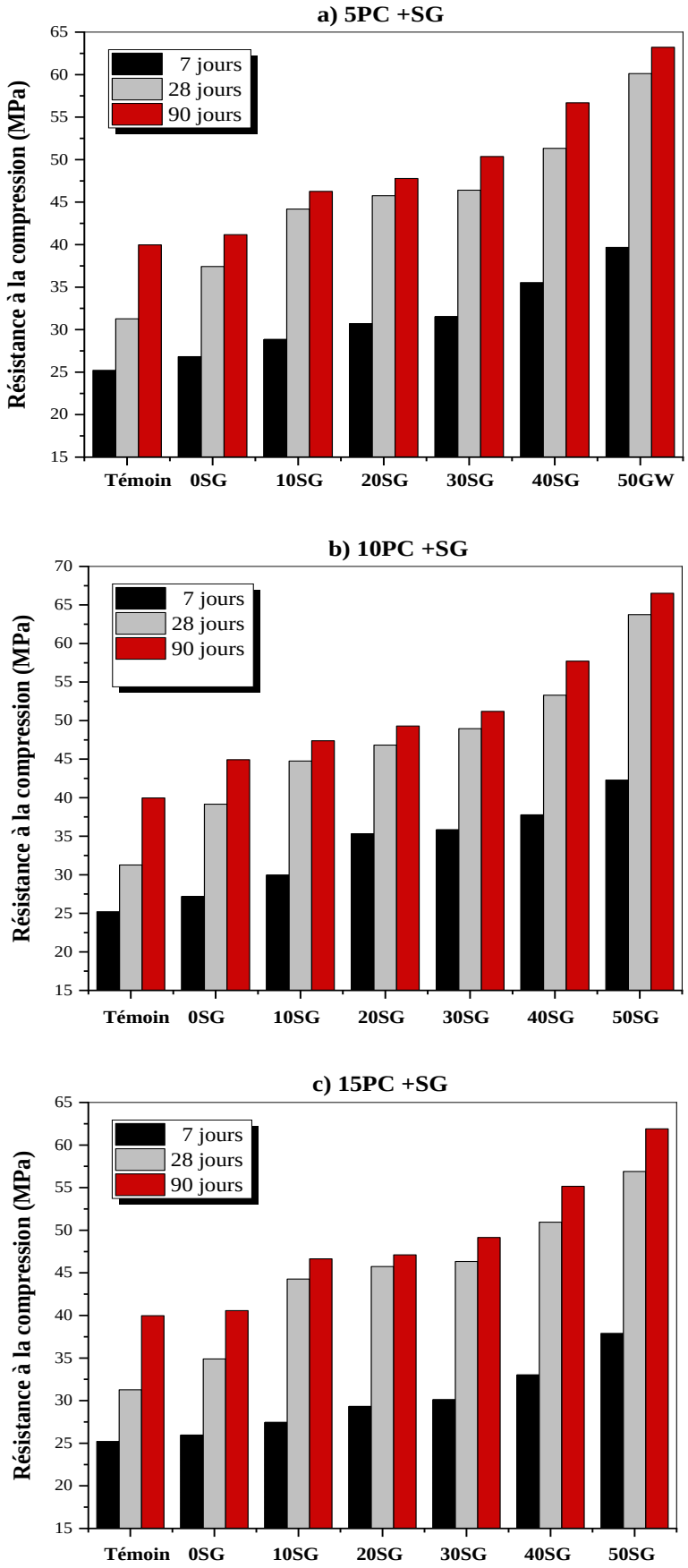
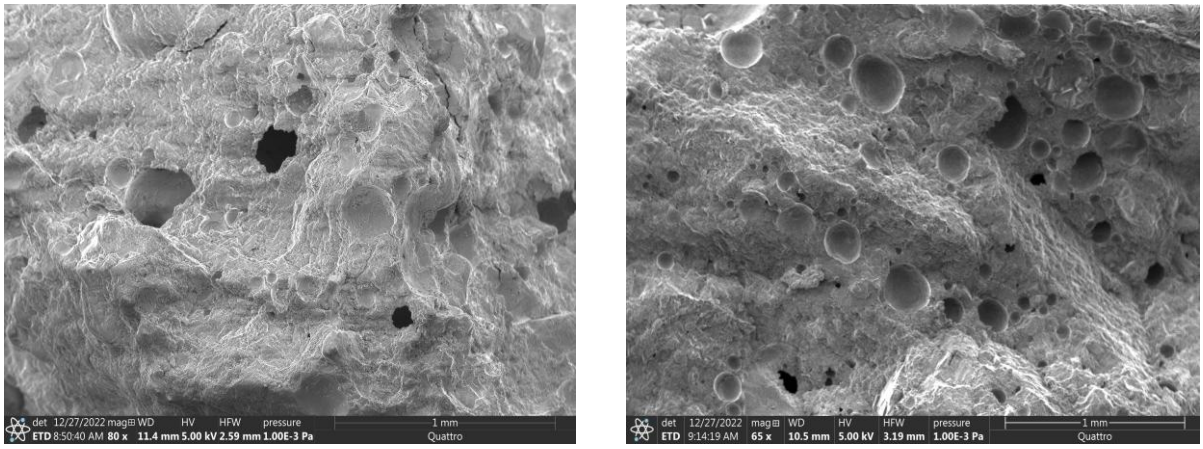


Figure IV.1 *:Résistance à la compression des différents BSF.*

Un examen par la microscopie électronique à balayage (MEB) est effectué sur des échantillons de BSF. La figure IV.2 illustrait des images d'analyse au MEB pour les mélanges 5PC + 50SG, 10PC + 50SG et 15PC + 50SG respectivement. Selon ces images, on peut constater que les BSF à base de 5PC + 50SG, 10PC + 50SG ont une microstructure plus dense avec une zone de transition interraciale (ZTI) entre les granulats de SG et la pâte cimentaire par rapport au mélange 15PC + 50SG qui présentait plus des pores, des moins longs dans la ZTI entre les granulats de SG et la pâte cimentaire. Ces constatations peuvent expliquer la bonne adhérence entre le SG et la pâte de ciment, ce qui affecte positivement la résistance à la compression des BSF avec des taux de 5% et 10% en PC.

5PC+50SG **10PC+50SG**



15PC+50SG

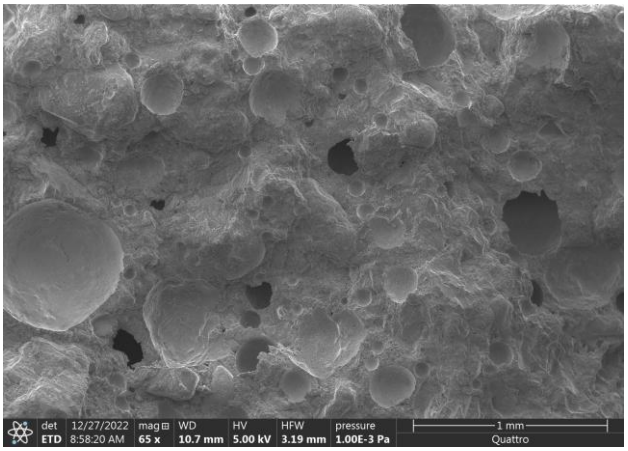


***Figure IV.2** : Examen au MEB des différents BSF.*

IV.2.2. Résistance à la flexion

L'effet de la PC et du SG sur la résistance à la flexion des différents BSF à l'âge de 7, 28 et 90 jours de durcissement est représenté sur la figure IV.3 (a, b et c).Cette figure montre que la résistance à la flexion des BSF augmente lorsque le SG est substitué aux mélanges, surtout avec des pourcentages élevés d'incorporation (40et 50%). La raison de l'amélioration de cette dernière est la forme irrégulière (angulaire) et la surface rugueuse du SG qui a développé une forte adhérence entre les particules du SG et la matrice cimentaire, qui crée ainsi une forte zone de transition à l'interface, où la force se déclenche lorsque la charge est appliquée. Ce résultat de l'augmentation de la résistance à la flexion est obtenu par plusieurs chercheurs **[242-245]**. Sarbjeet et al. **[246]** ont trouvé que le remplacement partiel (50%) du sable naturel par le sable de déchets du granite dans la composition des bétons a une influence comparable à celle des bétons de référence sur la résistance à la flexion. Au-delà de 50% de remplacement du sable, la résistance à la flexion diminue.

De plus, dans la figure IV.3, il est illustré que l'amélioration de la résistance à la flexion pour les mélanges de BSF (SG+PC) pourrait être attribuée à la substitution de PC dans le béton de sable fluide. La résistance à la flexion des mélanges sans SG augmente avec l'augmentation des pourcentages de PC. La résistance à la flexion du mélange BSF sans PC et SG à l'âge de 90 jours (BSFT) est de 5.45 MPa, et augmente à 6,1 MPa, 6,3 MPa et 5,9 MPa, en substituant le ciment par 5%, 10% et 15% PC, respectivement. L'étude menée par Hazurina et al. **[247]** sur l'influence de PC sur les propriétés mécaniques de bétons a montré des résultats similaires de développement de la résistance pour le même pourcentage de PC. La substitution de PC dans le béton améliore l'adhérence entre la pâte de ciment et les particules de granulats ainsi que renforce la zone de transition à l'interface qui à son tour améliore la résistance à la flexion.

Par exemple, la résistance à la flexion des mélanges BSF à l'âge de 90 jours s'améliore de 6,08%, 18,57% et 2,20% respectivement, pour une incorporation de 5%, 10% et 15% de béton en PC, par rapport au BSFT. Alors qu'une amélioration de 44,3%, 86,45% et 38,36% de la résistance à la flexion est détectée pour les mélanges de BSF avec 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG respectivement. Cette amélioration peut être attribuée au remplissage des vides dans la microstructure de béton par le gel C-S-H résultant de la réaction pouzzolanique de PC.

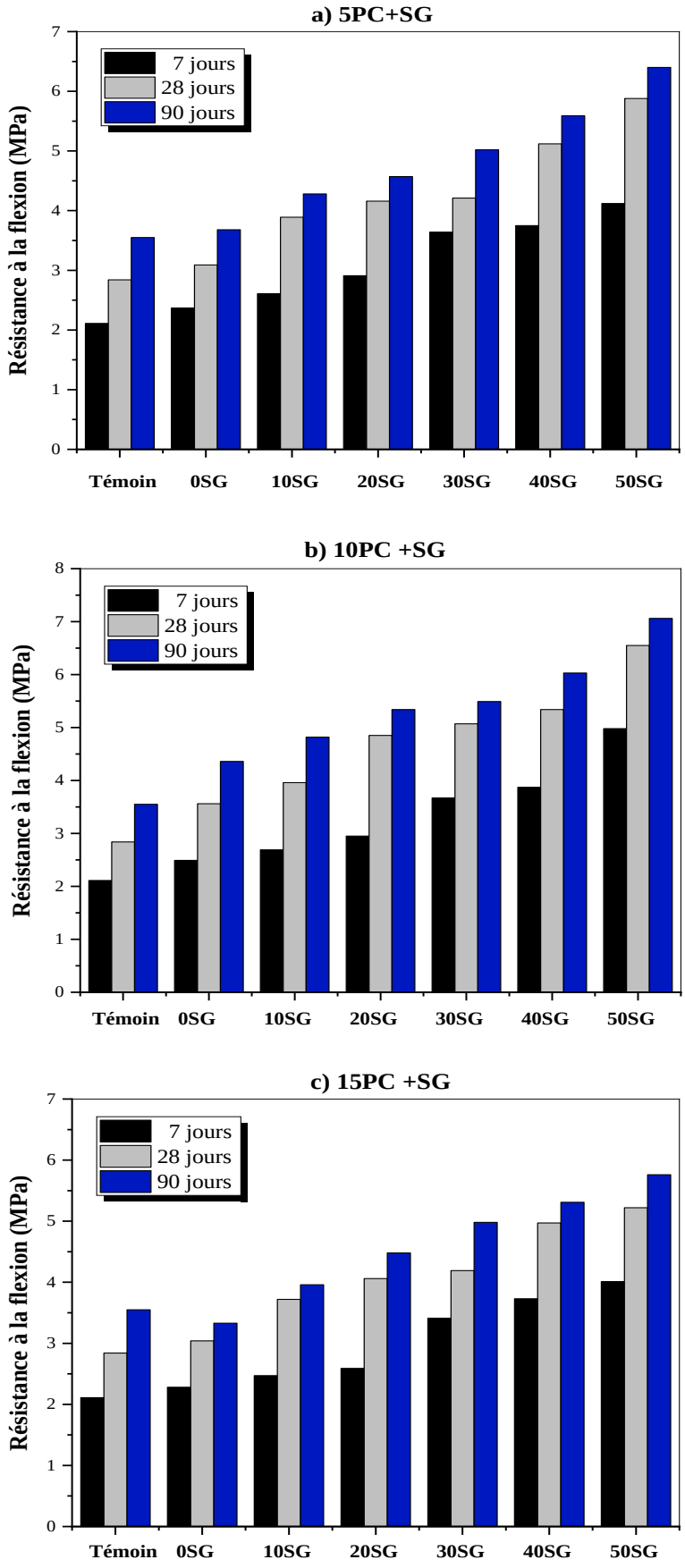


Figure IV.3 *:Résistance à la flexion des différents BSF.*

De plus, une autre observation notable sur la résistance à la flexion est que la résistance la plus élevée est observée lorsque 10% de PC a été ajouté aux mélanges de BSF.

IV.2.3. Vitesse d'auscultation sonique

La figure IV.4 (a, b et c)représente l'effet de PC et SG sur la variation de la vitesse d'auscultation sonique (VAS) effectuée à l'âge de 7, 28 et 90 jours de durcissement. Les résultats montrent que les valeurs de VAS augmentent à mesure que la substitution de SG augmente. Étant donné que les résultats de VAS dépendent de l'homogénéité, de la densité, du pourcentage des vides et des fissures dans la structure du béton, la présence de la pâte cimentaire sur la surface de SG diminue le système des pores, augmente la densité et améliore l'homogénéité, réduit ainsi la longueur de chemin pour la transmission des ondes ultrasonores, ce qui en conséquence augmente la vitesse d'impulsion. L'augmentation de VAS avec la substitution de SG est également montrée par les littératures précédentes **[248-249]**.

Cependant, l'incorporation de PC offre un chemin bénéfique pour améliorer les valeurs de VAS du BSF. Il est constaté que les valeurs de VAS des mélanges 5PC + 0SG, 10PC + 0SG et 15PC + 0SG de BSF sont supérieures à celles du béton de sable de référence (BSFT) de 7,94%, 9,30% et 4,57% respectivement. Il est clair que la PC provoque une densification de la microstructure et un remplissage des pores dans la matrice de ciment et dans la zone de transition entre les granulats et la pâte cimentaire. Les valeurs de VAS les plus élevées sont observées pour les mélanges fabriqués avec 10% de PC.

En ce qui concerne les BSF contenant de PC et SG, on note un développement des valeurs UPV de 4110.02 m/s, 4171.56 m/s et 3964.7 m/s pour les mélanges 5PC + 50SG, 10PC + 50SG et 15PC + 50SG respectivement, par rapport aux mélanges de référence (0PC+0SG).Cette amélioration est due à l'effet bénéfique de PC qui se caractérise par une grande finesse (8000cm^2/g). Cela pourrait créer une diminution des pores, et augmenterait par conséquent les valeurs d'UPV. De plus, on peut dire que l'ajout de PC présente l'avantage d'améliorer les valeurs d'UPV du BSF.

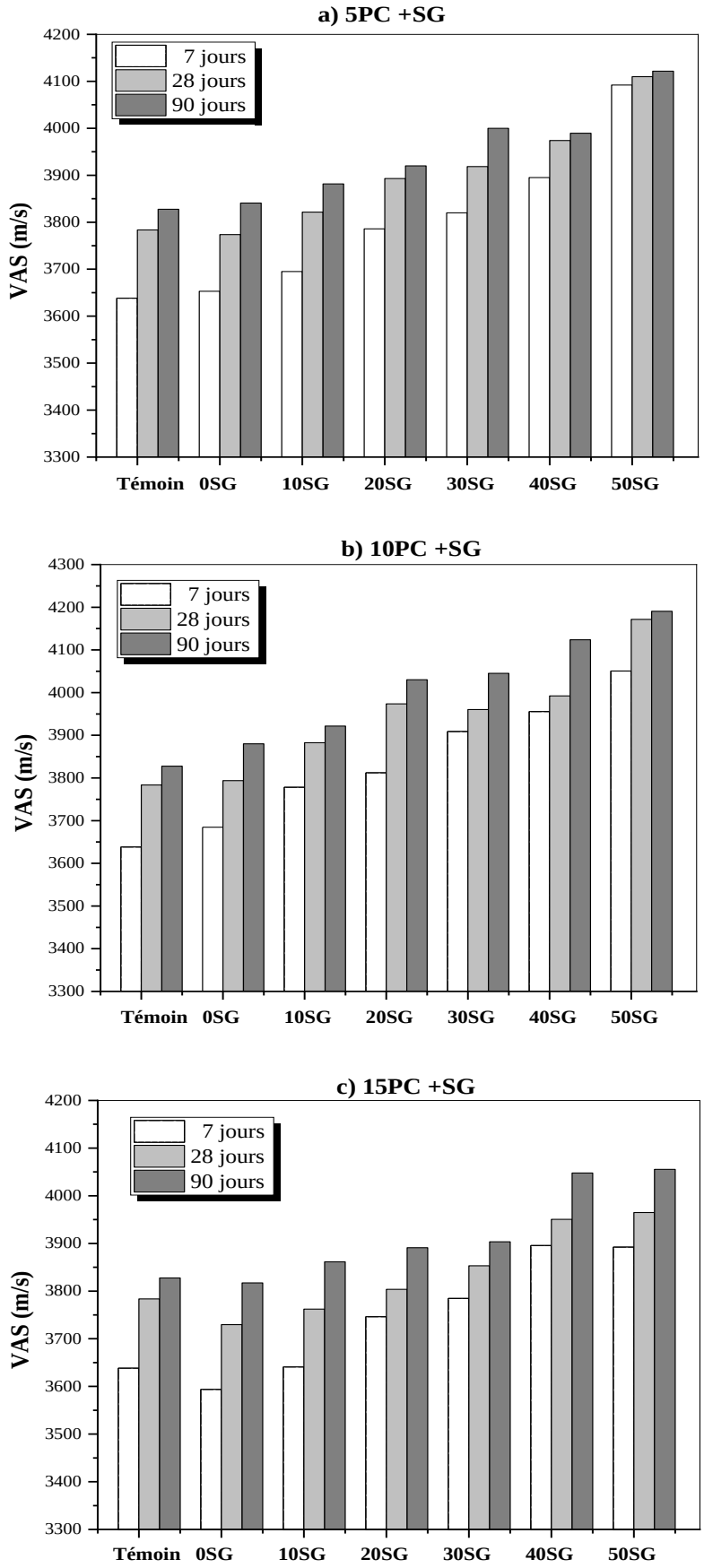


Figure IV.4 *: Vitesse d'auscultation sonique des différents BSF.*

IV.2.4. Module d'élasticité

Les résultats du module d'élasticité à 7, 28 et 90 jours de durcissement pour les différentes BSF sont illustrés dans la figure IV.5 (a, b et c). Au regard de cette figure, on observe que le module d'élasticité augmente avec l'augmentation de la substitution de SG dans les mélanges de BSF étudiés. À l'âge de 90 jours, on constate une augmentation de l'ordre de 12,67%, 13,42% et 10,77%, pour les mélanges 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG respectivement, par rapport au mélange avec PC sans SG (PC + 0SG). Cette augmentation du module d'élasticité est liée à l'excellente adhérence entre la surface rageuse des particules de SG et à la finesse élevée de la PC qui peut remplir les pores et compacter la microstructure de la pâte cimentaire **[250]**. Plusieurs chercheurs ont également étudié l'effet de l'utilisation des déchets de granite dans la production du béton et ont constaté une amélioration des performances mécaniques du béton **[246, 248, 251-255]**. Divakar et al. **[252]** ont étudié l'influence du granulat de granite sur les performances mécaniques des bétons. Ils ont noté que le module d'élasticité est inférieure avec un pourcentage de 50 % à celui du béton de référence. Arivumangai et al. **[253]** ont réalisé une recherche expérimentale sur l'effet de déchets de granite recyclé sur les performances mécaniques du béton. Ils ont observé que la substitution du sable naturel par le SG dans la composition des bétons, contribuait à l'amélioration des performances mécaniques.

Cependant, la substitution de PC dans les mélanges de BSF a un impact positif sur l'amélioration du module d'élasticité des BSF par rapport au mélange de référence (0PC + 0 SG). Le module d'élasticité à l'âge de 90 jours des BSFT augmente de 38.20 GPa à 40.16 GPa pour le mélange (10PC + 50SG) avec un taux d'amélioration de 4.48%. Cette amélioration du module d'élasticité pourrait être liée à l'effet du remplissage où des particules de PC remplissent les micropores entre les grains de granulats et la pâte de ciment, et à la réaction pouzzolanique de la phase amorphe (CaO) du PC avec l'hydroxyde de calcium C-H qui formé le gel C-S-H secondaire, ceci provoqué un remplissage des pores et micropores et donc une matrice cimentaire plus dense, par conséquence une amélioration des résistances à la compression et du module d'élasticité.

La figure IV.5 montre que le remplacement partiel(10%) du ciment par la PC dans les mélanges de BSF contribue à l'amélioration du module d'élasticité. Au-delà de 10% d'incorporation du PC, le module d'élasticité diminue, mais reste toujours supérieur à celui du béton témoin.

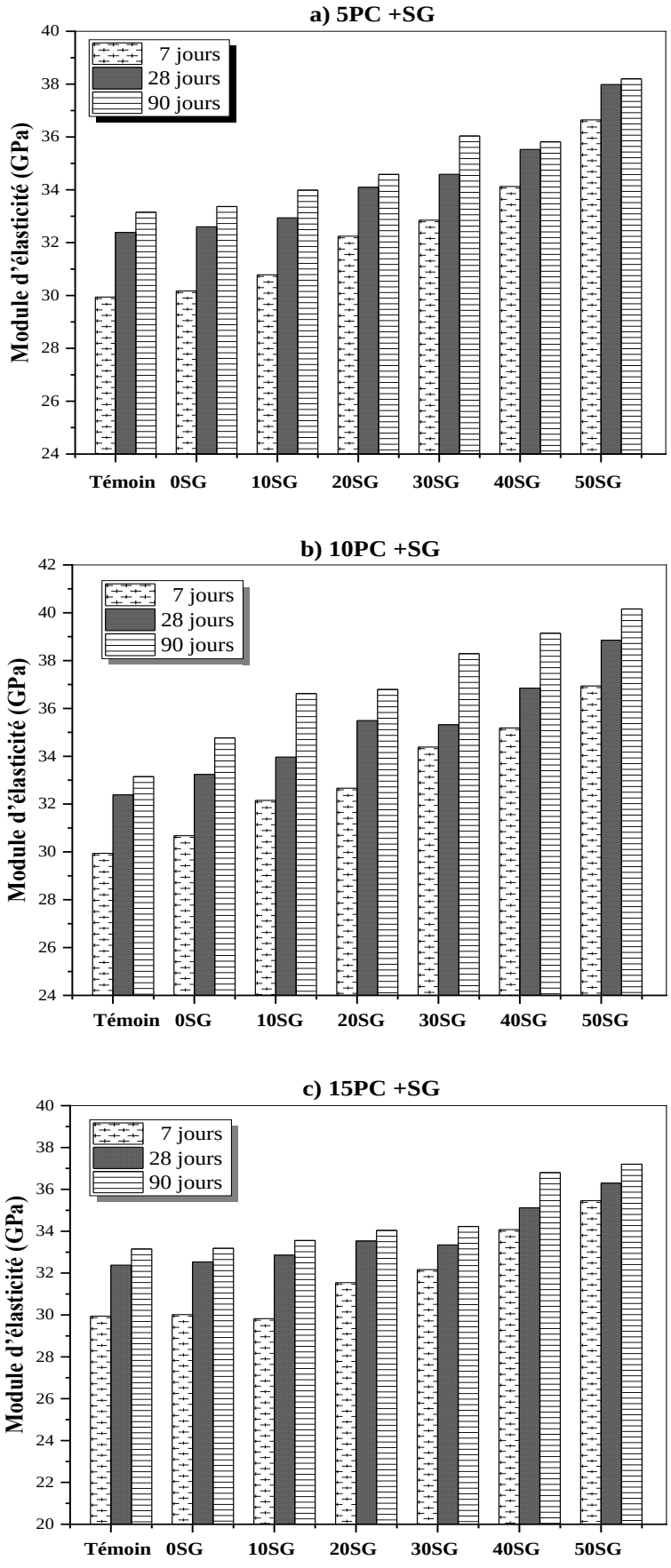


***Figure IV.5** : Module d'élasticité des différents BSF.*

IV.2.5. Porosité accessible à l'eau

L'effet de PC et du SG sur le pourcentage des vides de tous les mélanges de BSF sont quantifié à partir des résultats de tests de porosité est présenté sur la figure IV.6. Il est observé d'après cette figure, que le pourcentage des vides diminue avec l'augmentation de SG. De manière générale, la substitution des SG diminue le volume total des pores dans les BSF, ce qui entraine ainsi une porosité faible et une structure dense, minimisant également le réseau de pores. Le pourcentage de vides diminue considérablement grâce à la substitution de PC dans le béton de sable fluide (PC+0SG). Les résultats illustré dans la figure IV.6 montrent une diminution de la porosité au fur et à mesure que l'inclusion de 5%, 10% et 15% de PC augmente ; cette porosité était très faible par rapport au béton de référence, ce qui montre que la PC réduit positivement la porosité. Pour le mélange témoin (0PC+0SG), la porosité était de 5,37 %, elle est diminue à 5.16 %, 4.57 % et 5.31 % pour les mélanges 5PC + 0SG, 10PC+0SG et 15PC+0SG, respectivement. Cette diminution de la porosité s'explique par le fait que la PC a rempli les pores par l'augmentation des produits d'hydratation formés à partir de la réaction pouzzolanique résultant de la teneur élevée en CaO **[254]**. Hasnaoui et al. **[255]** ont rapporté également que le remplacement du ciment par la poudre de coquillage diminuait la porosité. L'inclusion de 15 % de PC a entraîné une porosité élevée par rapport aux mélanges à 5 % et 10 % de PC en raison de la longue durée d'hydratation lorsqu'une quantité importante de ciment a été remplacée.

De plus, l'incorporation de PC aux mélanges de BSF semble avoir un impact plus important sur la diminution du pourcentage des vides. Pour les mélanges BSF contenant 50% de SG et 5 à 15% de PC, le pourcentage de la porosité diminue de 5.37% à 4%, 2.95% et 4.18% respectivement. Comme montré dans la figure IV.6, le pourcentage des vides (porosité) des mélanges de BSF montre une diminution optimale avec 10% de PC. Cette réduction de la porosité est due au remplissage des vides dans la microstructure de BSF par les particules plus fines (8000 cm^2/g) de PC ainsi qu'à la formation des produits d'hydratation résultants de la réaction pouzzolanique **[256]**.

Les figures IV.7, IV.8 et IV.9 présentent les images de MEB des différents mélanges de BSF 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG à l'âge de 90 jours. D'après ces figures, on peut remarquer que les mélanges avec 5PC + 50SG, 10PC + 50SG ont une microstructure uniforme et une faible porosité entre la pâte cimentaire et les granulats. Par contre, le mélange 15PC + 50SG présente des micropores et des fissures (interconnectés) entre la pâte de ciment

et les granulats, ce qui peut influencé négativement sur l'adhérence entre la matrice cimentaire et les surfaces de granulats. Comme il est illustré dans les images de MEB, la taille des pores est plus faible pour les mélanges 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG respectivement. Cela peut être due à la réaction pouzzolanique générée par la PC. Par conséquent, ce réseau étroit de formations d'hydratation a été formulé avec des résidus mineurs de CH, ce qui expliquerait la réaction pouzzolanique entre PC et CH qui contribue à affiner la porosité du liant.

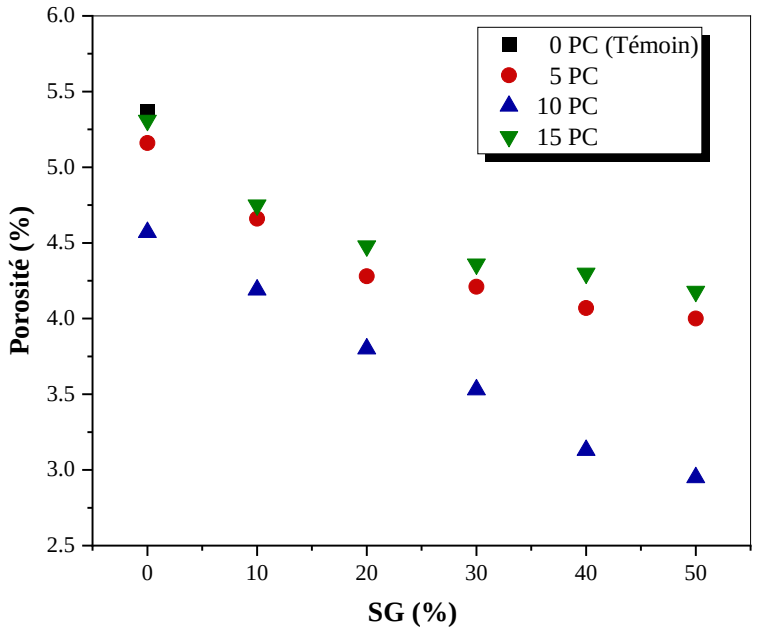


***Figure IV.6**: Porosité des différents BSF.*

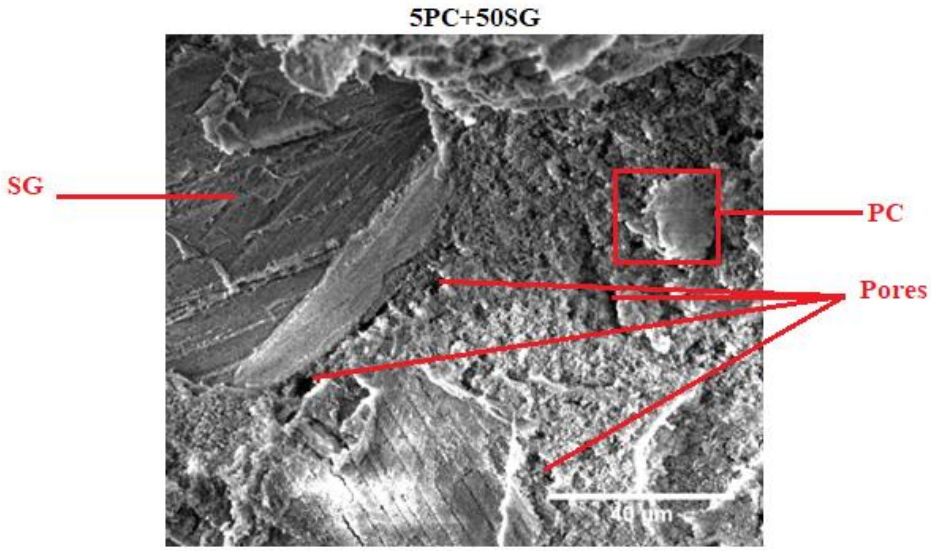


***Figure IV.7** : Examen au MEB de BSF à base de 5PC+50SG.*

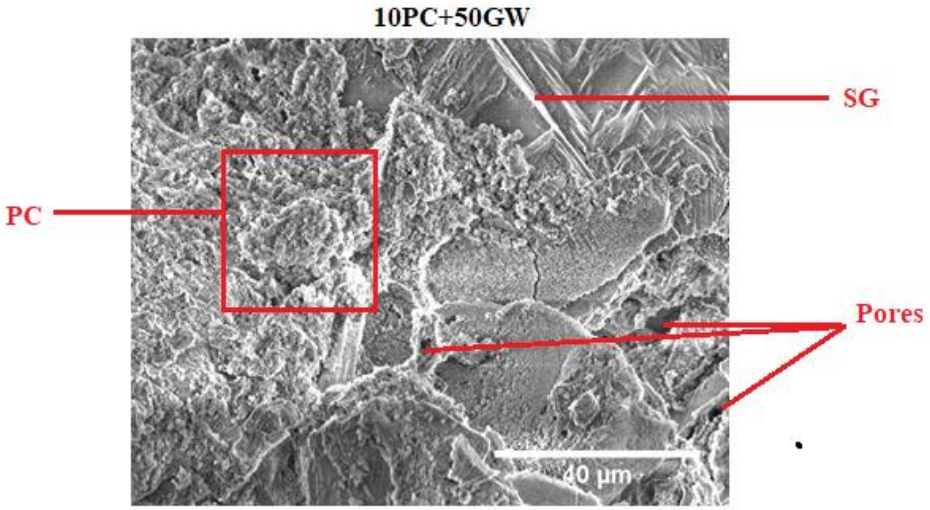


***Figure IV.8** : Examen au MEB de BSF à base de 10PC+50SG.*

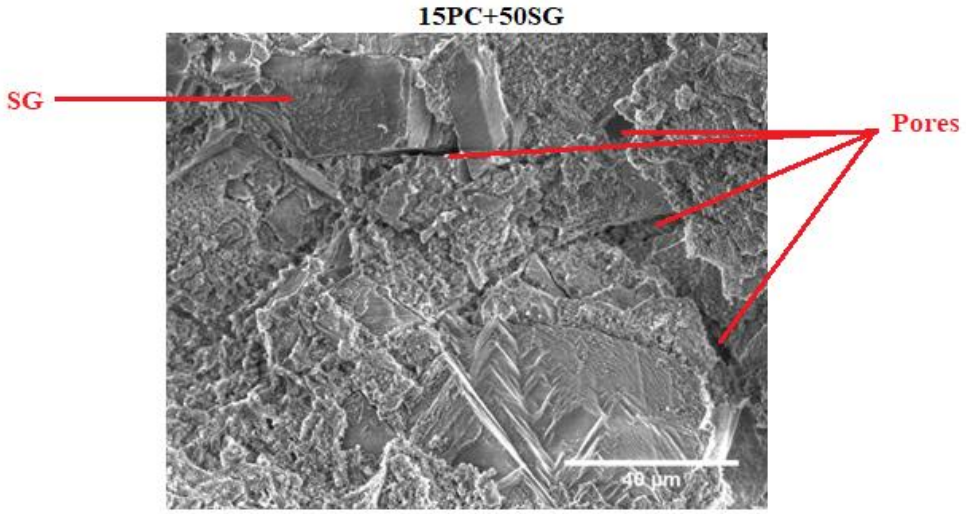


***Figure IV.9** : Examen au MEB de BSF à base de 15PC+50SG.*

IV.2.6. Absorption d'eau

L'influence de PC et SG sur l'absorption d'eau par immersion totale des différents mélanges de BSF est présentée dans la figure IV.10. Cette figure montrent que les valeurs de l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la substitution de SG, ceci pour tous les mélanges de BSF. D'après cette figure IV.10 on observe que le mélange témoin (BSFT) est celui qui a le coefficient d'absorption le plus grand par rapport au coefficient d'absorption des autres mélanges, et diminue au fur et à mesure que la teneur en SG augmente. On note d'après les résultats obtenus une diminution significative de l'absorption d'eau surtout lorsque leur

substitution de SG combiné atteint 50%. Cette diminution était de l'ordre de 31.68, 33.04, et 27.54% pour les mélanges avec 5PC + 50SG, 10PC + 50SG et 15PC + 50SG respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC+0SG). Cette réduction de l'absorption d'eau est liée à la faible porosité de la microstructure qui est caractérisée par une structure dense due à la bonne granulométrie de SG (0- 4 mm).

Chaudhary et al. **[257]** ont étudié l'absorption d'eau des bétons autoplacant à base des granulats de déchets de granité recyclé. Ils ont rapporté que l'absorption d'eau diminue avec l'incorporation de granite comme granulats jusqu'à 40%, ceci est fournissant une structure imperméable dans la matrice cimentaire en béton, ce qui rend plus difficile pour la pénétration d'eau à l'intérieur du de béton. Sharma et al. **[258]** ont étudié l'effet de l'utilisation de déchets de granite comme granulats sur l'absorption d'eau de béton. Ils ont montré une réduction de l'absorption d'eau avec la substitution de déchets de granite dans la composition de béton. Cette réduction de l'absorption d'eau peut s'expliquer par le fait que les particules de granulats de déchets de granite sont caractérisées par des surfaces très rugueuses par rapport au granulats naturel, ce qui peut diminué les micropores de la zone de transition par l'amélioration de l'adhérence entre la pâte cimentaire et les particules de granite.

Selon les résultats de la figure IV.10, on remarque aussi que le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'ajout de la PC. La valeur minimale de l'absorption d'eau est enregistrée dans la série des BSF avec 10% de la PC, ceci est justifié par le faible volume des pores (macropores) par rapport aux autres séries de BSF (5% PC et 15% PC), l'augmentation de la porosité est liée à la vitesse d'hydratation plus lente du PC par rapport au ciment **[247]**. Ces résultats obtenue montrent que l'utilisation de la PC à la place du ciment a diminué la capacité d'absorption d'eau par la diminution de la porosité du BSF, c'est-à-dire, la réduction du volume des vides et des macropores existant dans le BSF qui devient ainsi plus dense, plus étanche à l'eau et plus durable. Hazurina et al. **[247]** ont étudié l'effet de l'utilisation de la poudre de coquillage sur les propriétés du béton. Pour cette étude, le ciment a été remplacé par la poudre de coquillage à différents taux de remplacement de 5, 10, 15, 25 et 50%. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la subduction de la poudre de coquillage diminuait le coefficient d'absorption d'eau du béton jusqu'à un remplacement de 10%. Au-delà de 10% d'incorporation du PC, le coefficient d'absorption d'eau augmente, mais reste tout jour supérieur à celui du béton témoin. Cette augmentation d'absorption peut être attribuée à l'hydratation plus lente du PC par rapport au ciment.

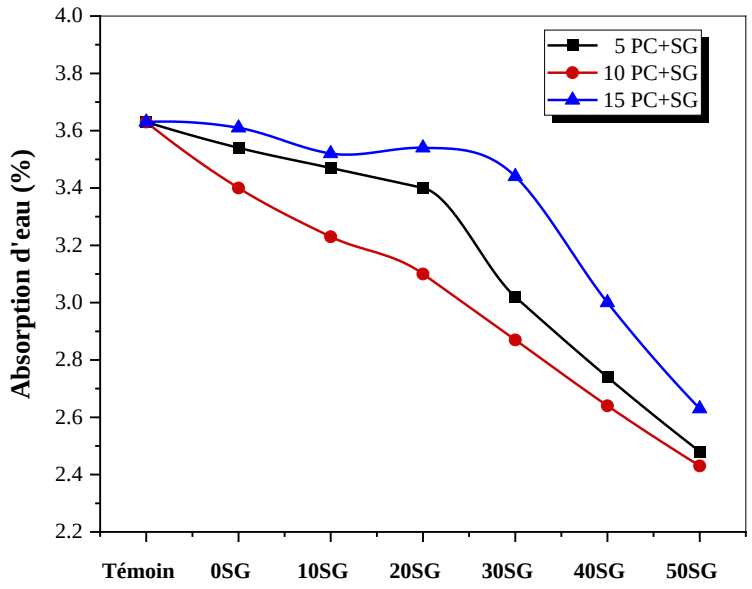


Figure IV.10 *:Absorption d'eau par immersion des différents BSF.*

Lorsque la surface du béton durci est en contact avec l'humidité, les micropores de la structure du béton absorbent l'eau par la propriété de l'aspiration capillaire. La dégradation (détérioration) sous l'exposition au cycle humide-sec et la durée de vie du béton peuvent être liées à son taux d'absorption (sportivité) capillaire. La figure IV.11 présente l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges du BSF avec la PC et le SG en fonction du temps allant jusqu'à 24 heures. D'après les résultats présentés dans cette figure, l'augmentation de la teneur en SG a entraîné une réduction des valeurs de sportivité des BSF, quel que soit le temps. D'après la figure IV.11, on peut conclure que la sportivité de BSF intégrant 50% SG avec différents taux de substitution de la PC (5,10 et 15%) diminue avec l'augmentation du contenu en PC. Il est important de noter que la réduction de l'absorption capillaire des BSF après 24 heures d'immersion était de l'ordre de 38.52, 42.85, et 32.90% pour les mélanges avec 5PC + 50SG, 10PC + 50SG et 15PC + 50SG respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC+0SG). On peut voir que le comportement de l'absorption capillaire des BSF a été similaire à celui de l'absorption d'eau par immersion totale.

Zafar et al. **[259]** ont examiné l'effet du granulat du granite recyclé sur l'absorption d'eau des bétons. Ils ont rapporté que, la diminution de l'absorption avec l'augmentation de granulats du granite recyclé a un effet positif en termes de durabilité .

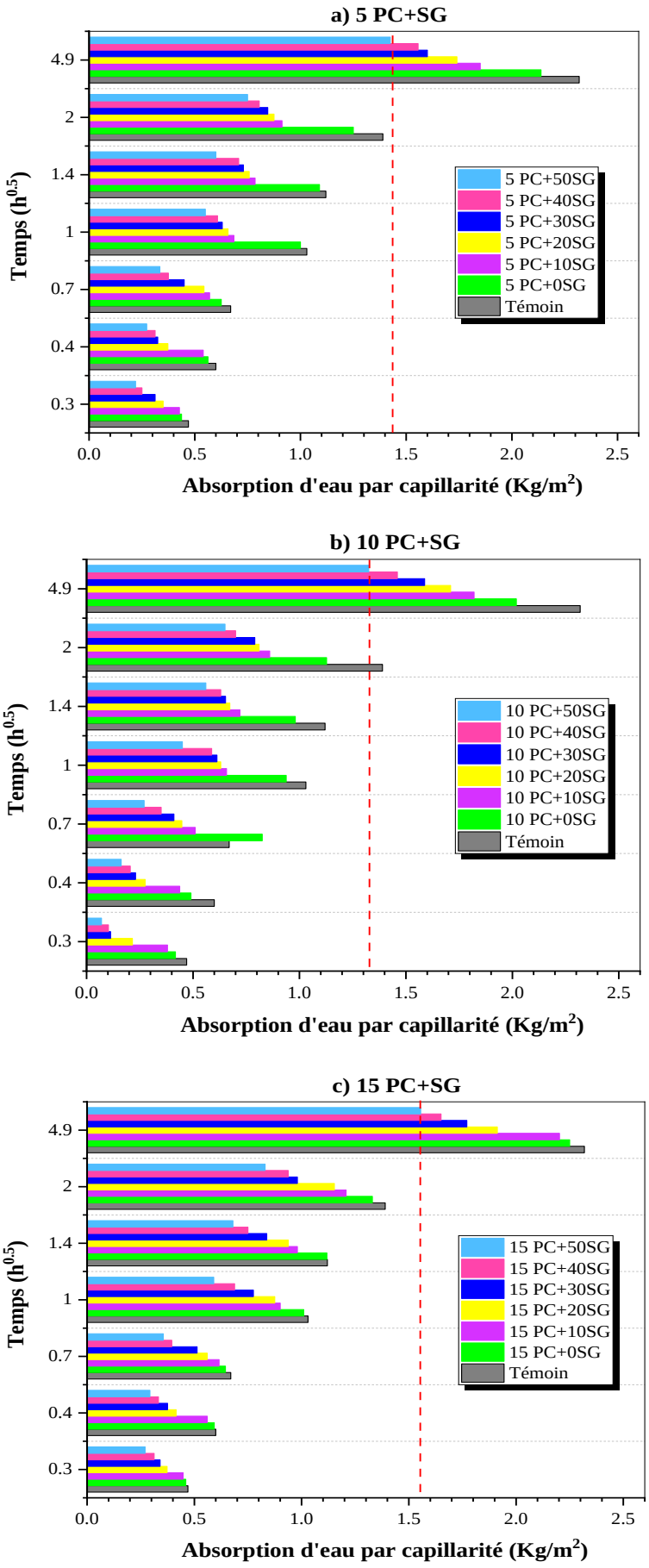


Figure IV.11 *:Absorption d'eau par capillarité des différents BSF.*

IV.2.7. Résistivité électrique

Les caractéristiques de la durabilité des bétons armé peuvent être détecté en mesurant par exemple la résistivité électrique des bétons. En général, la résistivité électrique des bétons est directement proportionnelle à la microstructure poreuse du béton. En d'autres termes, plus la résistivité électrique du béton est élevée, plus la résistance à la corrosion due à la pénétration des attaques chimiques à l'intérieur du béton ne peut pas être importante. Hwang et al. **[260]** ont rapporté que la valeur minimale de la résistivité électrique des bétons à la quelle la corrosion ne peut se former pas est supérieure à 20 kΩ-cm. Les résultats de la résistivité électrique pour les différentes BSF confectionnés après 90 jours de durcissement sont représentés dans la figure IV.12. Ces résultats montrent que les valeurs de la résistivité électrique augmentent avec l'augmentation de la substitution du SG. On note une amélioration de l'ordre de 31.86%, 39.32% et 28.93% pour les mélanges 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC + 0 SG). Ceci pourrait être attribué à la diminution des micropores dans la zone de transition entre pâte de ciment et les surfaces des grain du SG qui augmente par conséquent les valeurs de la résistivité électrique.

Shamsabadi et al. **[261]** ont étudié l'influence de la substitution de la poudre de granite recyclée en poids du sable sur la résistivité électrique du béton. Ils ont trouvé que la résistivité électrique du béton augmente avec l'augmentation de teneur en poudre de granite dans le sable jusqu'à une substitution de 40%.

Cependant, l'ajout de la PC dans les mélanges des BSF a une influence positif sur l'amélioration des résistivités électriques par rapport au mélange témoin sans PC. La résistivité électrique de BSFT (mélanges de témoin) était de 28.07 kΩ-cm, elle est augmentée de 30.07 kΩ-cm, 34.33 kΩ-cm et 29.13 kΩ-cm pour les mélanges contenant de 5, 10 et 15 % de la PC respectivement, qui sont plus élevées que celles du BSFT de 6.65 %, 19.63 % et 3.63 %. Cette amélioration des valeurs de la résistivité électrique pour les BSF est bénéfique en termes de béton structurel et durable vis-à-vis de la corrosion. De plus, l'amélioration la plus importante de la résistivité électrique est enregistrée pour les mélanges contenant 10 % de la PC. Cette amélioration important de la résistivité électrique est due à la faible porosité de la microstructure.

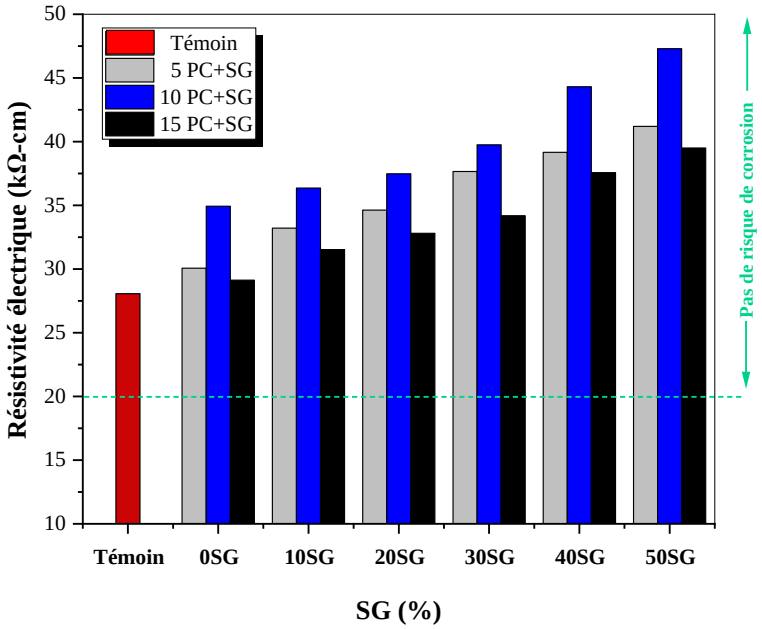


Figure IV.12 *:Evaluation de la résistivité électrique des différents BSF.*

IV.2.8. Conductivité thermique

Dans cette étude, le béton de sable fluide est peut être utilisé pour construire des bâtiments économiques (éco-bâtiments). La discussion se concentre donc sur leurs propriétés thermiques dans leur application en tant que murs extérieurs et/ou matériaux de dalles. La figure IV.13 montre les résultats de la conductivité thermique pour les différents mélanges de BSF déterminés en fonction de la substitution de PC et SG. D'après les résultats de la figure IV.13, l'augmentation de la substitution en SG a entraîné une augmentation des valeurs de la conductivité thermique des BSF. Il est important de noter que la conductivité thermique des BSF contenant 50% de SG avec 5, 10 et 15 % de la PC (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG) était 44.11%,46.17% et 30.74% supérieure respectivement, à celle du béton témoin (BSFT). Cela peut être dû à la compacité élevée conséquente à la microstructure moins poreuse avec l'ajout combiné de PC et SG. Zafar et al. **[259]** ont étudié la conductivité thermiques des bétons à base des déchets de granite recyclé. Ils ont observé que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la teneur de déchets de granite comme remplacement partiel du sable.

D'après la figure IV.13, on peut voir aussi que la conductivité thermique des mélanges de BSF contenant 5%, 10% et 15% de la PC sans SG (5PC+0SG , 10PC+0SG et 15PC+0SG) diminue avec l'augmentation du contenu de la PC. La conductivité thermique de mélanges du

BSFT était de 1.9 W/m.k, et elle augmente à 1.95 W/m.k et 2.08 W/m.k pour les mélanges contenant de 5 et 10 % de PC respectivement. Cependant, au-delà de 10% d'ajout du PC, la conductivité thermique diminue à 1.39 W/m.k pour les mélanges contenant de 15% en PC , qui est inférieure à celle du béton témoin. Cette réduction en conductivité thermique peut être attribuée à la microstructure poreuse des BSF avec l'ajout de 15% de la PC **[262]**.

La conductivité thermique dépend de la distribution de la taille des pores et de la connectivité des pores **[263, 264]**. Par conséquent, tous les paramètres qui influencent la conductivité thermique ont permis d'augmenter les valeurs de conductivité avec le remplacement de la PC en raison de la diminution de la taille des pores, de la connectivité et de la distribution par l'effet de colmatage dû à la dispersion de la PC et à l'augmentation de la concentration des produits pouzzolaniques dans la matrice de la pâte de ciment. Les résultats permettent d'interpréter que l'ajout de la PC a augmenté la conductivité thermique de manière optimale jusqu'à une teneur de 10% en raison de la microstructure relativement raffinée.

Lertwattanaruk et al. **[265]** ont examiné l'influence de la poudre de coquillages sur la conductivité thermique des mortiers. Ils ont rapporté que, la diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation de la poudre de coquillages a un effet positif en termes de isolation thermique du matériau cimentaire.

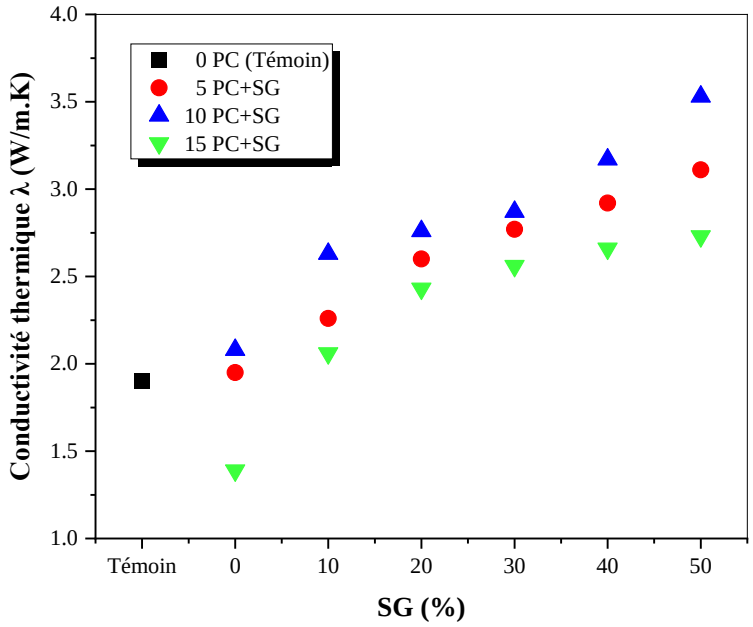


Figure IV.13 *:Evaluation de la conductivité thermique des différents BSF.*

IV.2.9. Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion est une propriété mécanique qui donne un excellent indicateur de la durabilité du béton vis-à-vis des charges de frottements. La résistance à l'abrasion dépend de nombreux facteurs tels que; la nature du matériau, la dureté du matériau et sa compacité. Les résultats de la résistance à l'abrasion en termes de coefficient d'abrasion (perte de masse) des différents BSF obtenus sont représentés dans la figure IV.14. D'après cette figure, les résultats obtenus révèlent clairement que le coefficient d'abrasion diminue lors que le pourcentage de substitution du SG augmente, ce qui indique l'amélioration de la résistance à l'abrasion. Pour le mélange de béton de sable fluide témoin (BSFT), le coefficient d'abrasion était de 3,87 kg/m^2, elle et diminue à 2.01 kg/m^2, 1.95 kg/m^2 et 2.19 kg/m^2 avec une amélioration de l'ordre de 48.06%, 49.61% et 43.41% pour les mélanges 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC + 0 SG). Les résultats ont montré que la résistance à l'abrasion optimale se développe pour les mélanges BSF contenant de 10 % de PC avec 50 % de SG. Cette diminution des coefficients d'abrasion des BSF est due à la dureté des particules de granite par rapport aux particules de sable naturel, ainsi qu'au développement d'une microstructure dense associée à la bonne gradation des particules de SG. En outre, la raison probable de la diminution des coefficients d'abrasion des BSF en est que les fines de SG remplissent les vides dans la microstructure du béton et produisent ainsi un béton plus compact et plus dense **[266]**. Cependant, la surface rugueuse et la morphologie angulaire des particules de SG et la réaction pouzzolanique de la PC donnent une liaison efficace entre les surfaces des particules de SG et la pâte cimentaire, ce qui entraîne une séparation plus faible des particules de SG et donc une résistance à la compression développée qui améliore la résistance à l'abrasion **[242]**. De plus, l'amélioration des propriétés de surface de béton sable fluide (surface compacte) a pu donner une meilleure résistance à l'abrasion avec un taux de substitution plus élevé de SG **[254, 267]**.

Jain et al. **[254]** ont étudié l'impact de la substitution du sable de déchets de granite par rapport au sable naturel sur la résistance à l'abrasion du béton autoplacant. Ils ont montré que la résistance à l'abrasion du béton augmente avec l'augmentation de la substitution de déchets granite dans jusqu'à une substitution de 60%.

Singh et al. **[266]** ont étudié l'influence de l'utilisation du déchet de granite (DG) comme remplacement partiel du sable naturel sur la propriété de la résistance à l'abrasion du béton. Ils ont observé une augmentation de la résistance à l'abrasion avec l'augmentation du

pourcentage de DG dans le mélange de béton jusqu'à 30% de remplacement. Par conséquent, des taux de remplacement plus élevés (au-delà de 30 %) entraînent une diminution de la résistance à l'abrasion du béton.

La figure IV.14 montre clairement que l'incorporation de la PC diminue les valeurs du coefficient d'abrasion. Le coefficient d'abrasion des BSF avec l'ajout de PC au taux de 5%, 10% et 15% passe de 3.69 kg/m^2, 3.56 kg/m^2 et 3.76 kg/m^2, respectivement, avec un ordre d'amélioration de 4.65%, 8.01% et 2.84% pour les mélanges 5PC+0SG, 10PC+0SG et 15PC+0SG respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC + 0SG). Cela indique que l'incorporation de PC est efficace pour améliorer la résistance à l'abrasion, ce qui peut être expliqué par la formation des nouveaux produits d'hydratation résultant de l'activité pouzzolanique de la PC. De plus, le finesse élevée de la PC (8000 cm^2/g) a diminué la taille des pores en termes de l'effet de remplissage, qui a également augmenté la compacité des mélanges, et donc donné des surfaces de BSF plus denses. Par conséquent, plus résistant à l'abrasion.

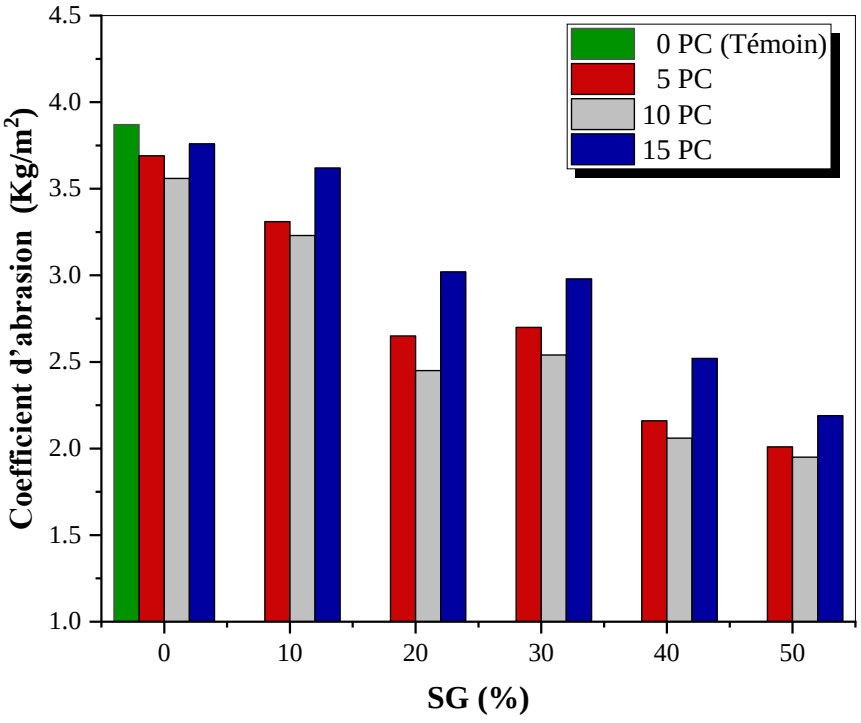


Figure IV.14 *:Résistance à l'abrasion des différents BSF.*

IV.2.10. Résistance à des hautes températures

IV.2.10.1. Perte de résistance à la compression

La figure IV.15 (a, b et c) montre la variation de la résistance à la compression résiduelle (RCR) des échantillons de BSF contenant différents pourcentages en SG et PC exposés à différentes hautes températures de 400°C, 600°C et 800°C. Comme on peut l'observer sur la figure, la perte de résistance de tous les mélanges de BSF diminue à mesure que la température d'exposition augmente. Cette diminution de RCR est attribuée à la déshydratation des hydrates de carbo-alumination de calcium, de l'ettringite, du gel C-S-H, à la déshydroxylation de la portlandite ($Ca(OH)_2$) et à l'évaporation de l'eau capillaire interne **[268, 269]**. D'après les résultats obtenus, on peut remarqué que pour les BSF exposés à une température de 400°C, l'augmentation du pourcentage en SG a entraîné une augmentation de la RCR. Pour les BSF exposés à une température de 600°C, la RCR a considérablement diminué plus que dans le cas d'exposition à une température de 400°C. Un effondrement total a été remarqué pour des échantillons de BSF exposées à une température de 800°C. Cependant, la RCR de tous les BSF contenant du SG était supérieure à celle des BSF contenant de 100% de sable naturel, ce qui montre que le SG a contribué à l'amélioration de la RCR. De plus, pour une température d'exposition de 800 °C, la RCR du mélange BSF de contrôle sans PC et SG (0PC+0SG) est de 10.86 %, ce qui s'améliore à 19.89 %, 22.55 % et 27.52 % pour les mélanges fabriqués avec une combinaison de 5 %, 10 % et 15 % de la PC et de 50% de SG (10PC + 50SG, 5PC + 50SG et 15PC+50SG) respectivement, ce qui est de 45.39 %, 51.84 % et 60.53 % plus élevé que le mélange BSF de contrôle. Le BSF avec 15% de PC et 50% de SG avait la résistance à la compression résiduelle la plus élevée par rapport à celle du BSF avec 5 et 10% de PC.

Concernant l'incorporation de la PC dans les BSF, et selon les résultats obtenus, on observe que les mélanges contenant 5%, 10% et 15% de la PC présentent une RCR supérieure à celle du mélange témoin (BSFT). L'incorporation de 15% de PC a augmenté la résistance à haute température du BSF mieux que 5% et 10% en raison de la faible porosité et de la microstructure dense des mélange avec 5% et 10% de PC. Ce résultat confirme que 15% de la PC avait une porosité élevée. La réduction de la résistance à la compression résiduelle des BSF avec 5% et 10% de la PC et s'explique par la perte importante de la teneur en $Ca(OH)_2$, de l'ettringite, du gel C-S-H qui augmente l'écaillage de la surface en raison de la formation plus importante de fissures.

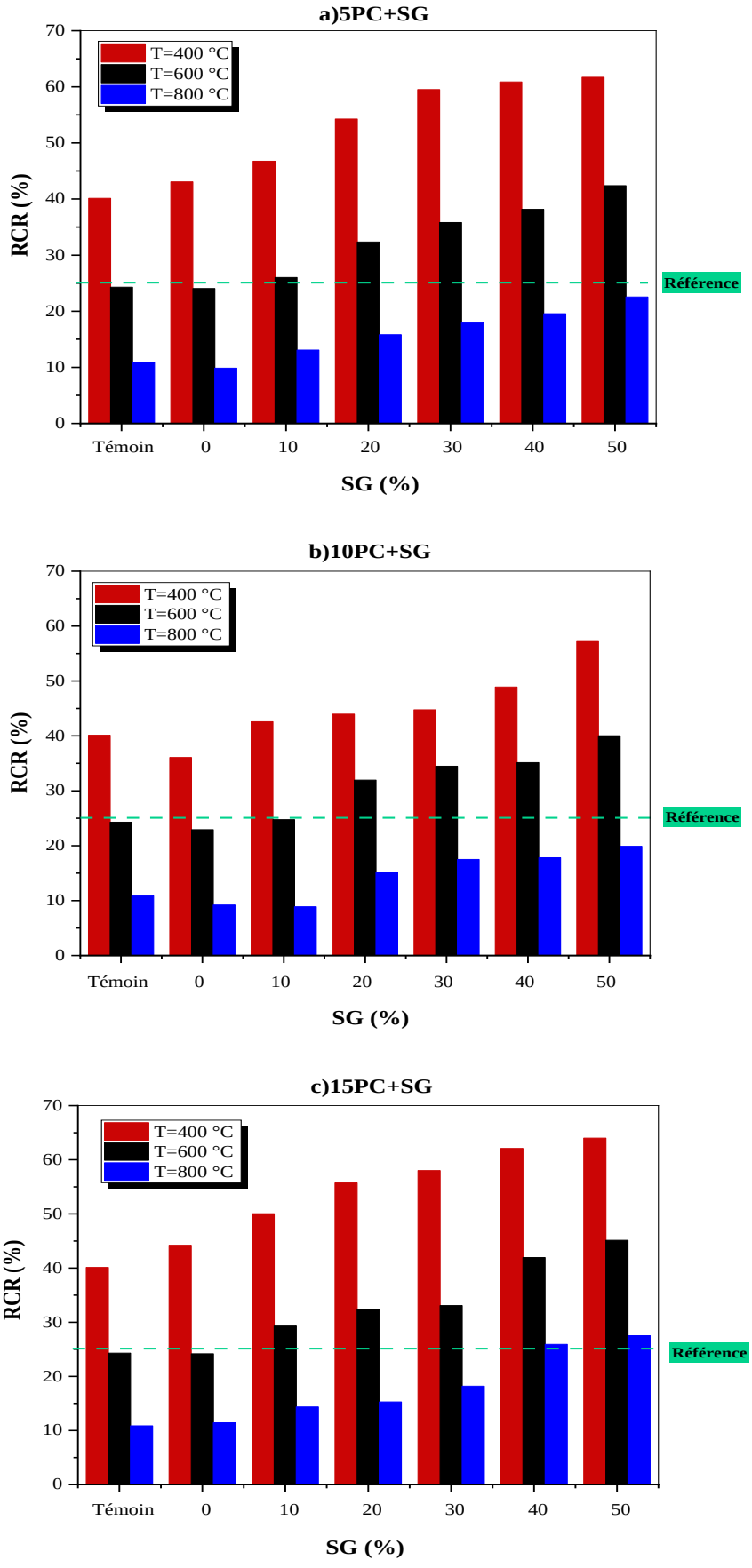


Figure IV.15 *:RCR des différents BSF après l'exposition au feu.*

Certains chercheurs **[270-272]**, ont rapporté que l'utilisation de la PC dans la formulation du béton avec un pourcentage important peut avoir une influence positive sur la résistance à haute température. Le processus de la diminution de la résistance à la compression résiduelle des bétons en tant qu'exposé à des hautes températures peut être également dû à la déshydroxylation du $Ca(OH)_2$, à la décomposition de $CaCO_3$ en CaO avec dégagement de 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 de résistance à la compression **[273]**. Certains chercheurs ont étudié plusieurs matériaux à base de la poudre de coquillage, la fumée de silice, la cendre volante et le métakaolin, et ont trouvé une amélioration de la résistance à la compression résiduelle à haute température **[272, 274-276]**.

IV.2.10.2. Perte de masse

La figure IV.16 (a, b et c) présente les résultats de la variation de la perte de masse des BSF après une exposition à différentes hautes températures de 400°C, 600°C et 800°C. Ces résultats montrent que quelle que soit la température d'exposition, la perte de masse de l'échantillon de BSF témoin était plus supérieure à celle des BSF avec SG et PC. Cette perte de masse est peut être due à un taux d'évaporation de l'eau capillaire interne plus élevé dans le BSFT **[277]**. De plus, c'était obtenue précédemment que le taux d'absorption d'eau des BSF témoin était plus élevée que celui des BSF à base de SG et PC. En autre, cette perte de masse est liée à la décomposition ou la décarbonatation d'autres composés par des processus tels que la décomposition des hydrates de l'ettringite, du gel C-S-H, de la décarbonatation de la portlandite ($(Ca(OH)_2$) **[277]**.

Dans tous les cas d'exposition à 400°C, 600°C et 800°C, le mélange de BSF composé de 10% de PC sans SG (10PC+0SG) est celui qui présente la valeur de la perte de masse la plus forte (9,5%) ; alors des valeurs de la perte de masse sont enregistrées d'environ 9% et 8% pour les mélanges de BSF composé de 5PC et 15PC (5PC+0SG , 15PC+0SG) respectivement. De plus, lorsque les échantillons de BSF sont exposés à des hautes températures (plus élevées), la teneur en humidité des pores fins de la pâte cimentaire et des particules de granulats sera perdue, ainsi la microstructure de déshydratation des produits d'hydratation (gel C-SH, les ettringites et la portlandite ($Ca(OH)_2$)) était également un facteur principal de la cause de perte de poids.

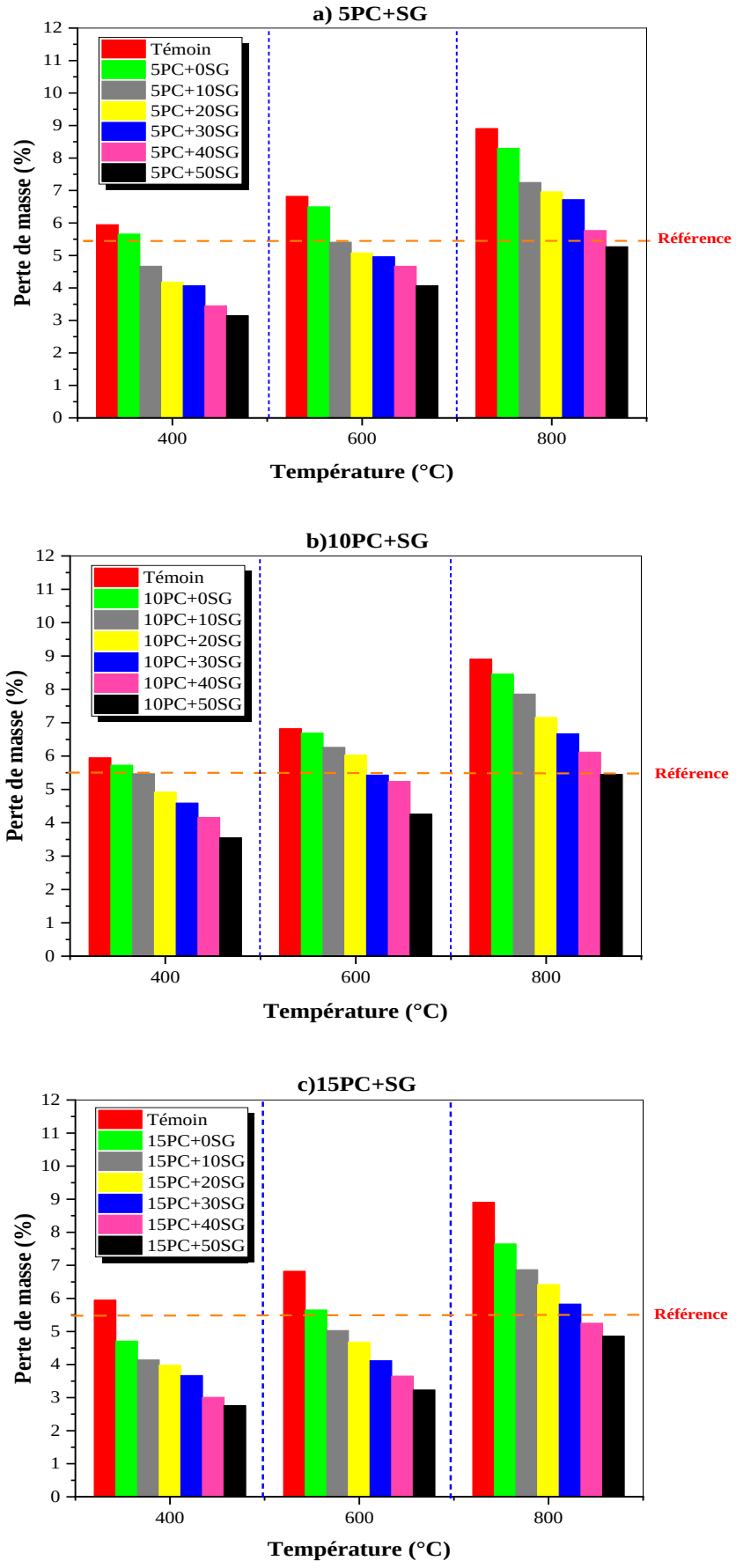


Figure IV.16 *:Perte de masse des différents BSF après l'exposition au feu.*

Les figures IV.17 et IV.18 présentent les images de MEB des différents mélanges de BSF (10PC+50SG et 15PC+50SG) après une exposition à une haute température (800°C). D'après la figure IV.17, on peut remarquer que les mélanges 10PC + 50SG ont une microstructure non uniforme et forte de porosité entre la pâte cimentaire et les granulats, ainsi que caractérisés par la présence des fissures et une faible zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats avec une présence des connotations des gels déshydratés, ce qui peut influencer négativement sur l'adhérence entre la matrice cimentaire et les surfaces de granulats et la résistance du béton de sable fluide vis-à-vis le feu. Par contre, la figure IV.18 montre que les mélanges avec 15PC et 50SG présentent un faible nombres de pores et de fissures entre la pâte de ciment et les granulats avec une excellente zone de transition. Comme il est illustré dans la figure IV.18, la taille des pores est plus faible pour les mélanges 15PC+50SG par rapport au mélange 10PC+50SG. Cela peut être dû à la faible quantité des produits d'hydratation générés par la PC qui donné un faible décomposition des hydrates, qui était également un facteur principal de la cause de la faible perte de la résistance et du poids.

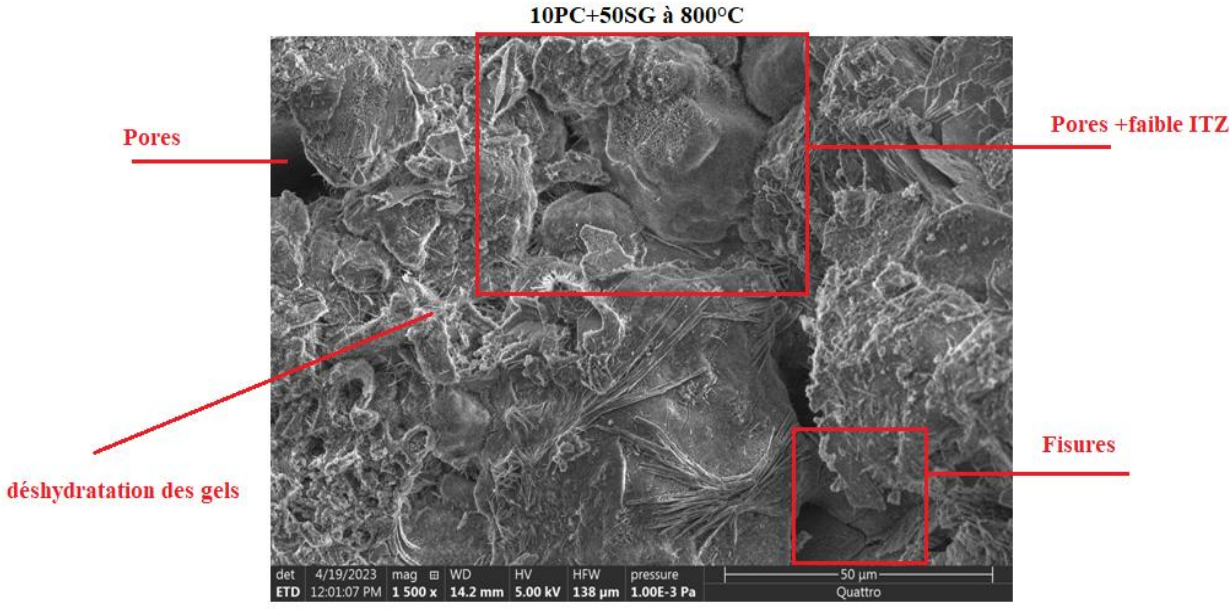


Figure IV.17 *: Examen au MEB de BSF à base de 10PC+50SG après l'exposition au feu.*

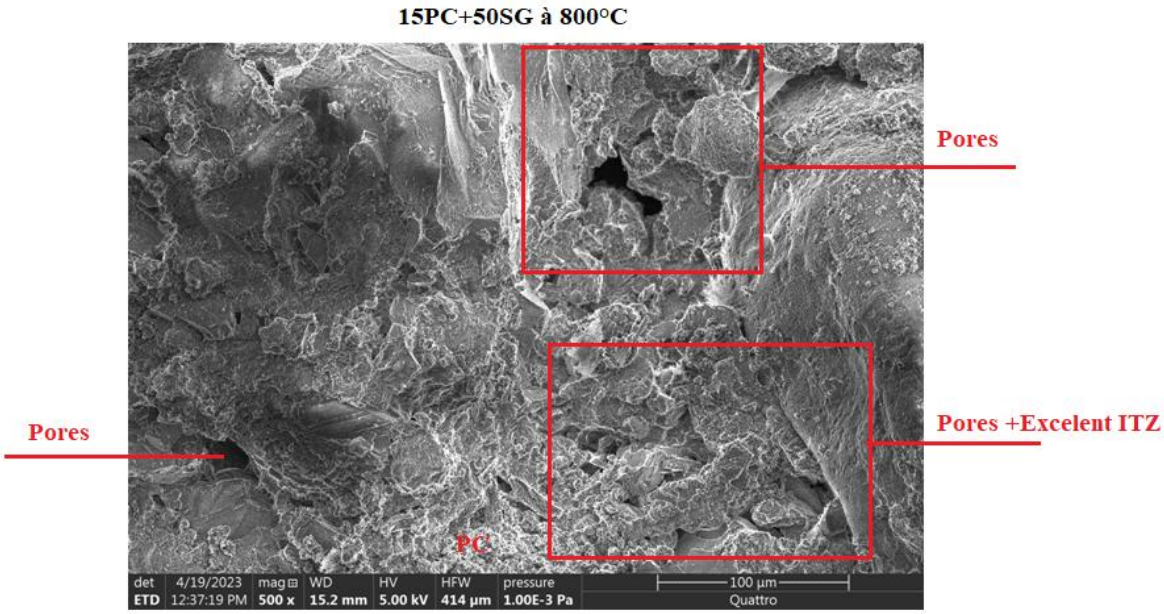


***Figure IV.18** : Examen au MEB de BSF à base de 15PC+50SG après l'exposition au feu.*

IV.2.10.3. Examen visuel

Les propriétés d'endommagement visuel des échantillons de BSF exposés à des températures élevées sont illustrées dans la figure IV.19. Cette figure montre que pour tous les échantillons de BSF, la détérioration et l'écaillage des surfaces et des bords augmentent à mesure que la température d'exposition augmente. En cas particulier, les échantillons de béton de référence (BSFT) sont les plus détériorés en comparaison avec les autres mélanges contenant des combinaisons de la PC et du SG.

Pour une exposition à une température de 400°C, nous n'avons noté qu'un léger effritement pour tous les échantillons de BSF (5PC + 50SG, 10PC + 50SG et 15PC + 50SG). Pour une exposition à des températures de 600°C à 800°C, nous avons observé des surfaces d'écaillage modérées et légères pour les échantillons contenant 5%, 10% et 15% de PC avec SG, respectivement. Cependant, nous avons observé une formation significative de fissures et un grand écaillage des surfaces et des bords, avec la détérioration de l'enrobage de la pâte autour des granulats pour les échantillons de BSF contenant 5% et 10% de la PC par rapport à 15%. Ces résultats ont révélé que l'utilisation de 15% de la PC améliorait la surface d'écaillage des échantillons de BSF exposés à des températures élevées.

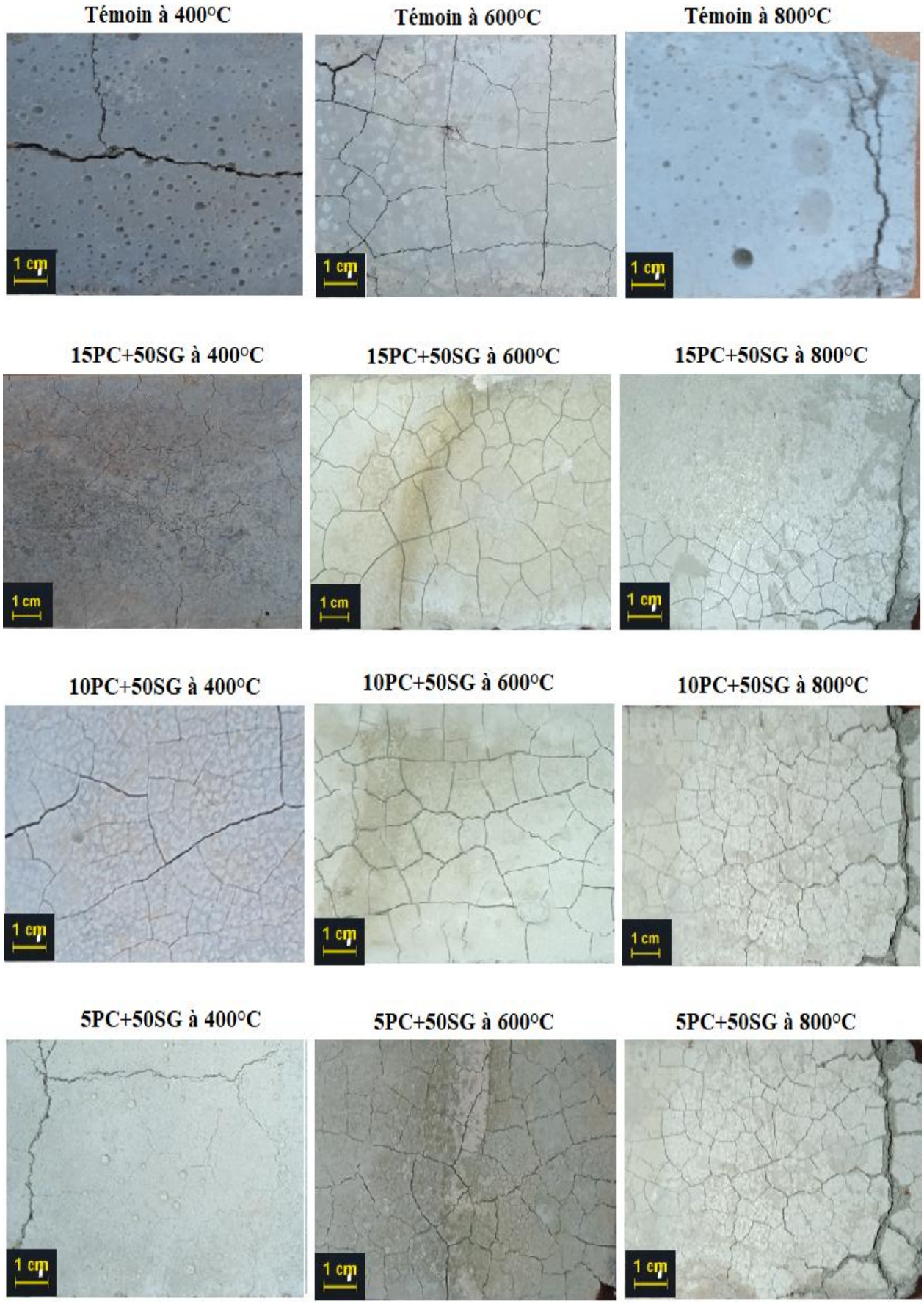


***Figure IV.19** : Examen visuel des différents BSF après l'exposition au feu.*

IV.2.11. Résistance aux cycles de gel-dégel

IV.2.11.1. Perte de masse et perte de résistance à la compression

Cet essai évalue l'effet du gel-dégel sur les propriétés de durabilité du béton. En général, le comportement du béton exposé aux cycles de gel-dégel est lié à plusieurs facteurs. Certains de ces facteurs sont la structure des vides, la taille des vides, le nombre de vides, la distribution des vides et la façon dont ils sont connectés les uns aux autres. En outre, d'autres facteurs sont la quantité d'eau à geler dans le béton, le degré de saturation, la vitesse de congélation, la résistance à l'absorption et les conditions de cure **[278]**. Pour la résistance au gel-dégel, la structure des vides du béton joue un rôle important. Lorsque des matériaux cimentaires supplémentaires sont utilisés dans des proportions appropriées, ils jouent un rôle positif dans l'amélioration des propriétés de la durabilité du béton **[279]**. Les dommages subis par les BSF ont été examinés en fonction des propriétés suivantes : la masse résiduelle, la résistance résiduelle à la compression et les observations visuelles (surface écaillée) après leur exposition à différents cycles de gel-dégel (60 cycles, 120 cycles et 240 cycles).

Les résultats de la perte en masses et en résistances sont évalués en terme de la masse résiduelle et de la résistance à la compression résiduelle (RCR) après l'exposition au plusieurs cycles du gel-dégel sont illustrés dans les figures IV.20 (a, b et c) et IV.21 (a, b et c), respectivement. Comme on peut l'observer sur ces figures, les valeurs de la masses résiduel et les valeurs de la résistance à la compression de tous les mélanges BSF diminuent avec l'augmentation du nombre des cycles de gel-dégel. En outre, il est observé qu'après l'application de cycles de gel-dégel, les valeurs de poids résiduel et de résistance à la compression des mélanges de BSF contenant le SG et la PC sont plus élevées que celles du mélange témoin (BSFT). Les valeurs du poids résiduel après 240 cycles des mélanges contenant 50% de SG avec 5%, 10% et 15 % de la PC (5PC + 50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG) sont respectivement de 89.47 %, 87.95 % et 90.19 %, soit 16.22 %, 14.78 % et 16.89 % plus grandes que le mélange de référence (BSFT). De même, la résistance à la compression résiduelle des mélanges 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG est respectivement de 88,68%, 86.74% et 89.15%, soit 12.08%, 10.12% et 12.55% plus élevée que celle du BSF témoin.

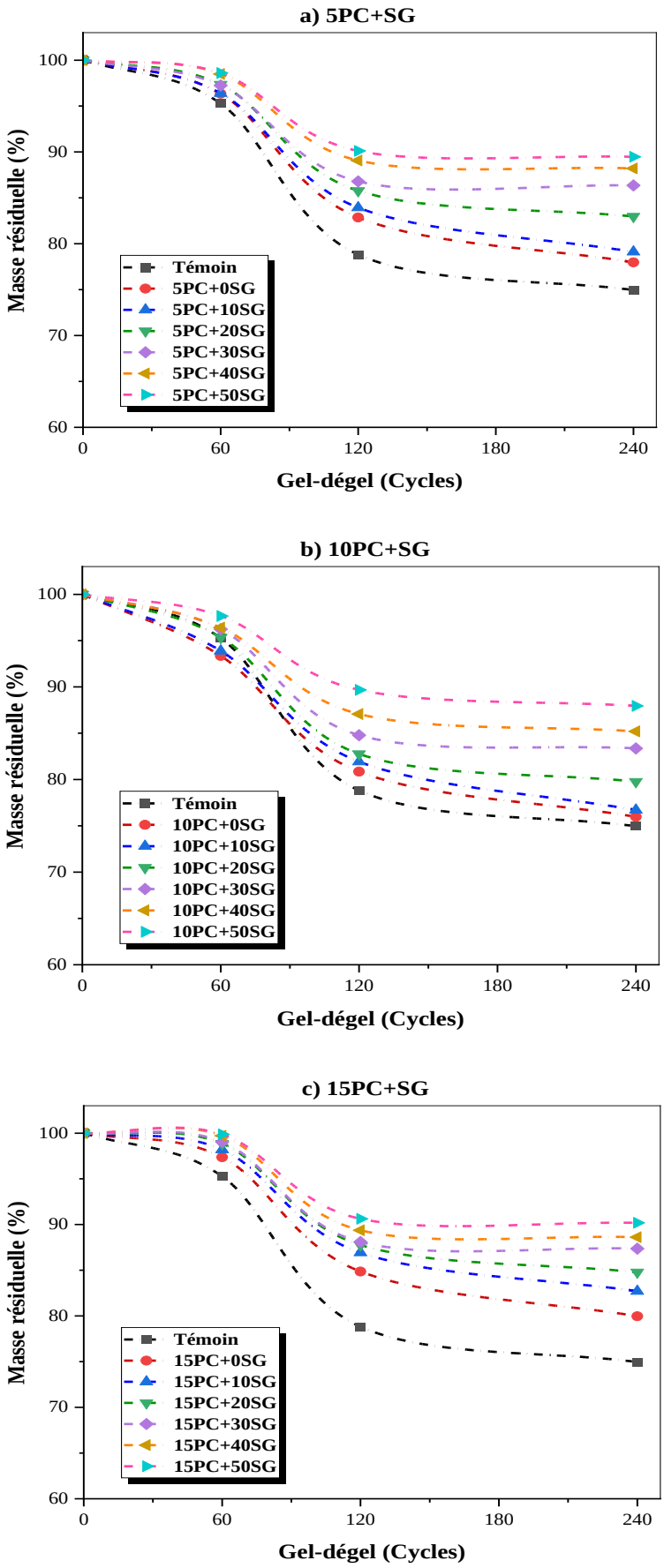


***Figure IV.20** : Masse résiduelle des différents BSF après l'exposition aux cycles gel-dégel.*

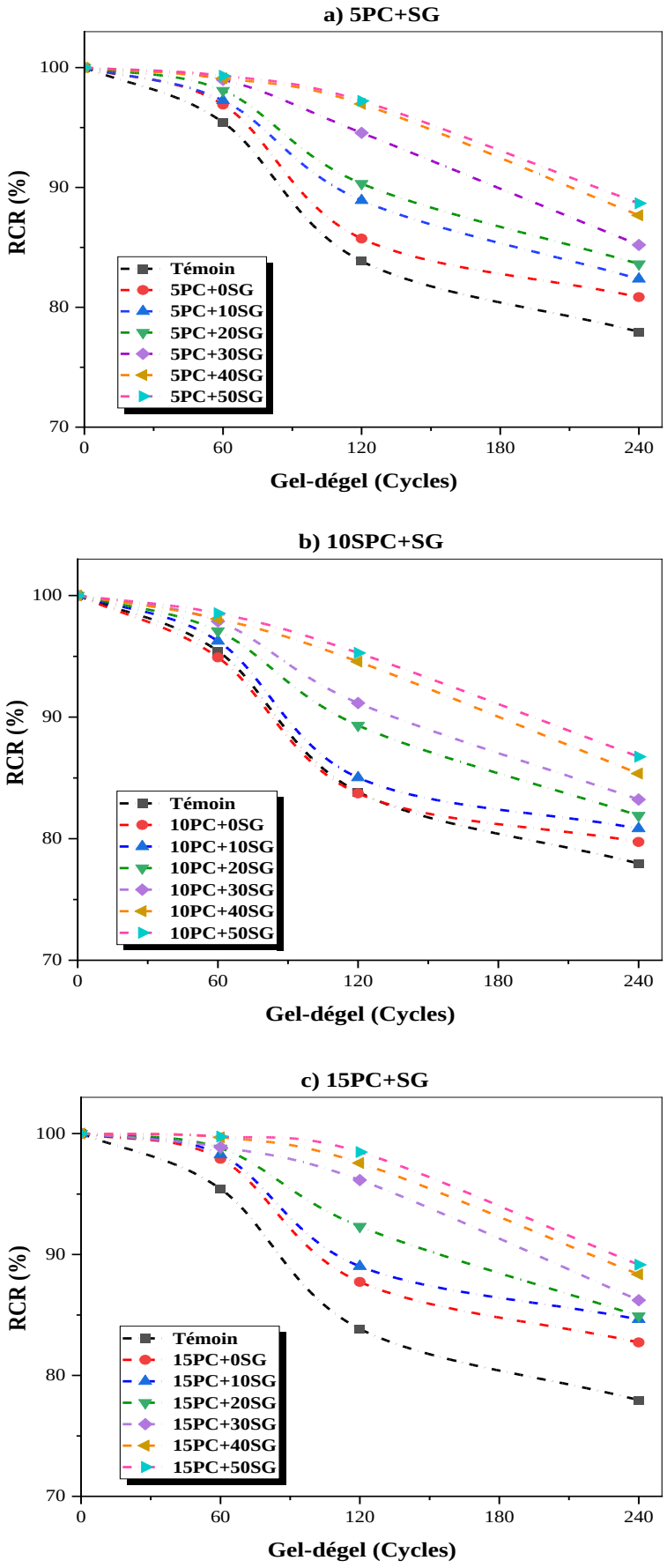


***Figure IV.21**: RCR des différents BSF après l'exposition aux cycles gel-dégel.*

Les résultats obtenus permettent de conclure que les mélanges de BSF à base de 15% de PC ont le poids résiduel et la résistance à la compression résiduelle les plus élevés. De plus, l'ajout de 15% de PC a conduit à une augmentation de la porosité par rapport aux mélanges à 5% et 10% de PC en raison du grand volume d'eau nécessaire pour achever le processus d'hydratation. Ces résultats indiquent que les mélanges de BSF contenant le SG et 15% de la PC présentent moins de dommages internes que les mélanges BSF fabriqués avec 5 et 10% de PC (voir la figure IV.22). Cette réduction des dommages internes s'explique par la porosité élevée de la microstructure des mélanges de BSF contenant 15% de PC par rapport aux mélanges contenant 5% et 10% de PC. Les vides d'air atténuent la pression hydraulique de la formation de glace dans les réseau poreux des échantillons de BSF avec 15% de PC et réduisent leur endommagement (faible perte de poids et de la résistance à la compression) par rapport aux échantillons de BSF avec 5 et 10% de PC. On peut conclure que la combinaison de la PC avec le SG pourrait améliorer les propriétés de durabilité des BSF exposés à des climats froids (présence du phénomène de gel-dégel).

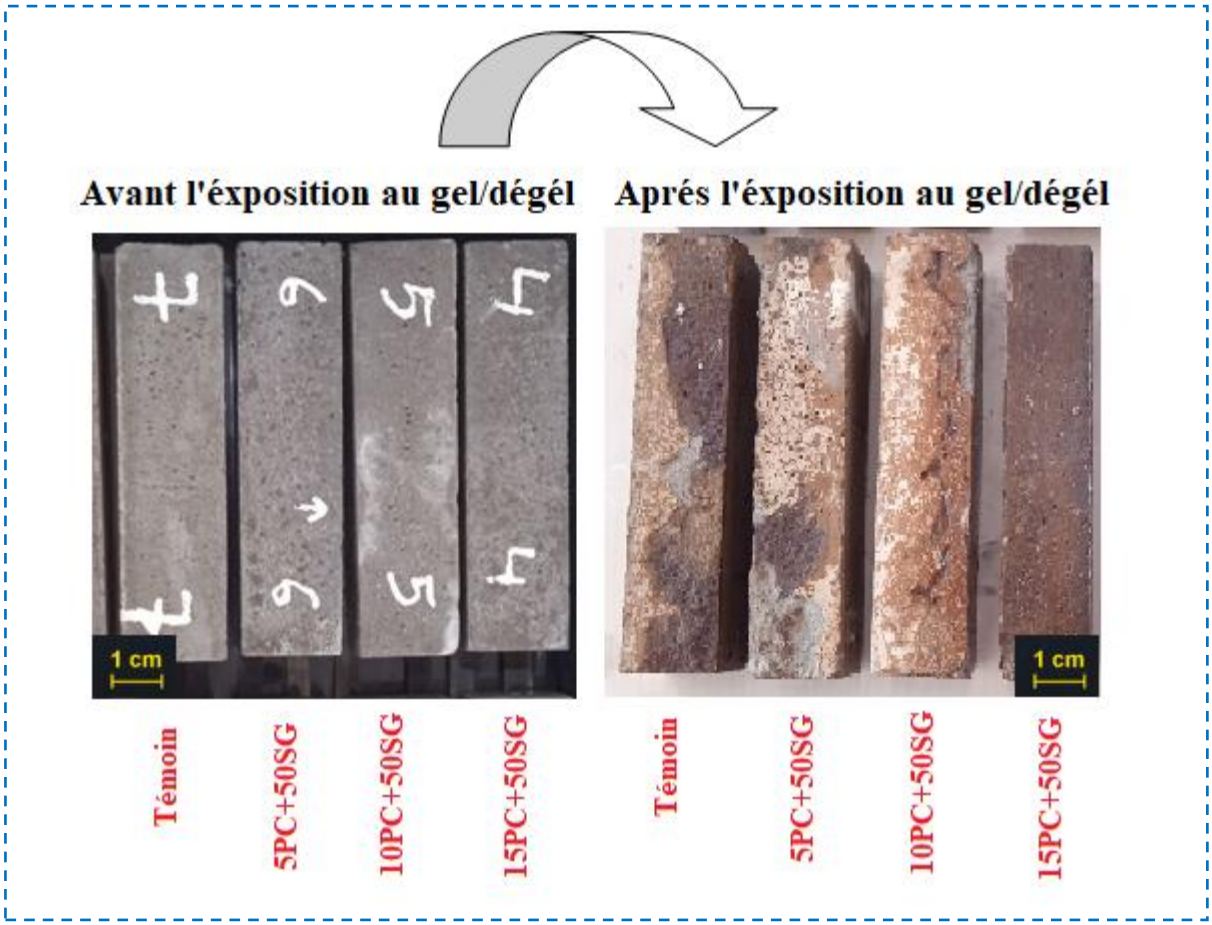


Figure IV.22 *: Etat visuel des différents éprouvette du BSF avant et après l'exposition aux cycles gel-dégel.*

De plus, on remarque aussi sur les figures IV.20 (a, b et c) et IV.21 (a, b et c), que la substitution de SG a diminué les perte en masse et en résistance à la compression des BSF par rapport à celle du BSFT. Ceci s'explique par la morphologie des particules du SG qui peut jouer un rôle important vis-à-vis de résistance au la phénomène de gel-dégel à long terme. Des modèles schématiques d'interface (ITZ) sont proposés sur la figure IV.23, dans lesquels les liaisons entre la pâte de ciment avec le SG et les granulats conventionnels (sable naturel) sont affichées respectivement. Un côté des granulats de SG avec des surfaces très rugueuses et vitreux, ce qui peut être dû à la forme angulaire, alors que d'autres sable naturel est des surfaces très lisse qui peut être dû à la forme sphérique.

Dans le cas de la congélation d'eau dans les micropores de la pâte cimentaire, des forces de pression hydrostatique sont formées. L'adhérence fort entre les particules de SG et la pâte cimentaire peut être établi d'un côté en raison de l'ancrage physique. Par conséquent, cela contribuera à l'amélioration de la zone de transition ITZ, ainsi qu'à l'amélioration de la résistance au gel-dégel. La force d'ITZ entre les particules de sable naturel peut être moins dense par rapport à l'ITZ des granulats de granite (Figure IV.23), cela peut être provoquer une détérioration facile.

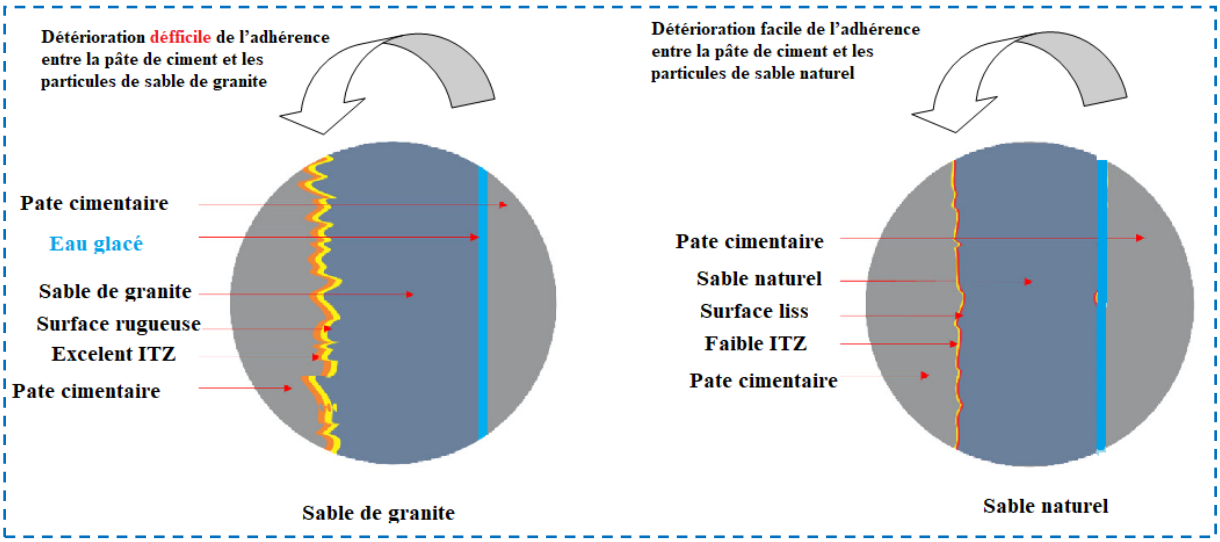


Figure IV.23 *:Explication schématique sur l'effet de gel-dégel sur l'interface entre les granulats et la matrice cimentaire (ITZ).*

IV.2.12. Réaction alcali silice

La figure IV.24 montre des observations par une analyse microscopique électronique à balayage (MEB) des BSF témoin avec de 100% du sable naturel après 90 jours de durcissement. Cette figure présente un présence du gel expansif et quelques fissures, ce qui confirme les résultats de la mesure de l'expansion. La figure IV.25 (a, b et c) représente la variation de la réaction alcali silice (RAS) pour les différents mélanges de BSF en fonction du temps d'immersion dans la solution de l'hydroxyde de sodium (NaOH) de concentration égale à 1%. Nous observons une augmentation continue de l'expansion de tous les échantillons de BSF jusqu'à 28 jours, l'expansion initiale à 3 et 7 jours varie entre 0,01%/ et 0,06% respectivement. La minéralogie du sable naturel (siliceux) utilisé dans cette étude pourra induire une cinétique rapide ou lente de la RAS à l'âge de 14 et 28 jours. À la fin de 28 jours, l'expansion la plus grande a été constatée dans les échantillons contenant 100% de sable naturel (BSFT). Selon AS 1141.60.1 **[280]**, le sable naturel peut être classé comme matériau réactif ce qui explique le mécanisme de RAS par le processus chimique entre le sable naturel siliceux et les ions hydroxyle de ciment, qui conduit à l'évolution du gel visqueux alcalino-silicate **[281]**. Cette augmentation du volume est due au rapport SiO_2/CaO plus élevé, car les ciments sont constitués des produits d'hydratation riches en calcium (Ca) ,et fournissent suffisamment d'ions de calcium (Ca^{2+}) dans la solution interstitielle, qui facilement réagit avec la silice (SiO_2) du sable naturel et forme des composants expansifs **[282]**. Cependant, la composition minéralogique du SG (faible volume en SiO_2 par rapport au sable naturel) pourra réduire la cinétique rapide ou lente de la RAS dans le BSF.

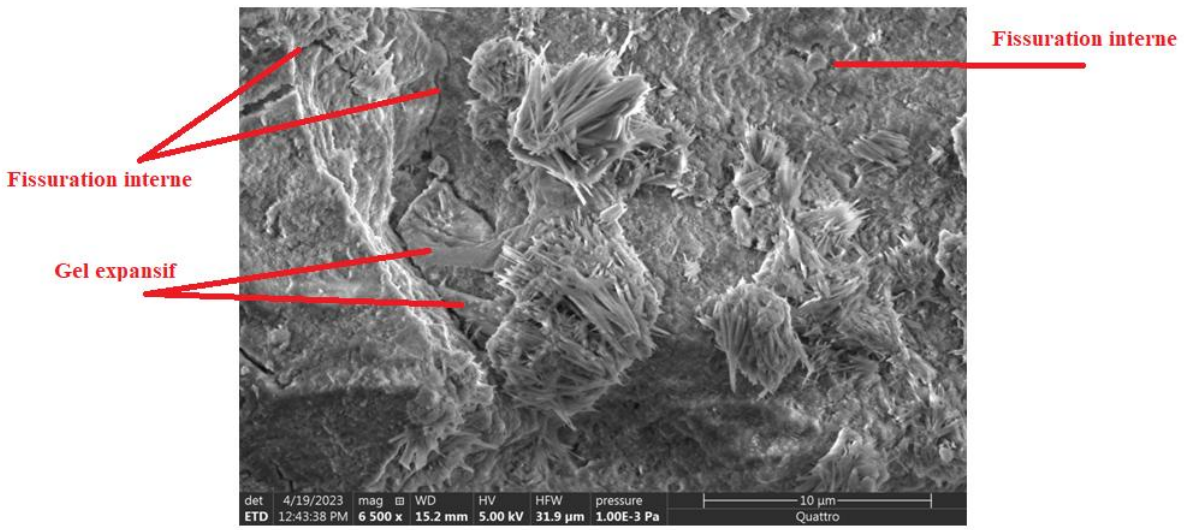


Figure IV.24 *:Observations par le MEB de BSF témoin après RAS.*

Les résultats de RAS présentés dans la figure IV.25 (a, b et c) ont montré que la RAS diminue avec l'augmentation de la substitution de SG. Les échantillons contenant de 50% de SG présentent l'expansion la plus faible. Cette diminution de RAS est due au faible pourcentage de silice (SiO_2) dans la composition chimique de SG, qui était de l'ordre de 48.9% par rapport au sable naturel qui contient un pourcentage en SiO_2 égal à 90.5%.

En revanche, les valeurs de RAS dans les échantillons de BSF de référence (BSFT) étaient beaucoup plus grandes que celles obtenues dans les échantillons de BSF avec la PC, mais toujours inférieures aux limites prescrites (0,1%). Avec l'inclusion de 5%, 10% et 15% de la PC dans les BSF, ou a consistent des valeurs de RAS inférieures aux limites prescrites (0,1%). Tandis que les échantillons de BSF contenant de 5% de PC présentent des valeurs d'expansion plus élevées par rapport à celle des échantillons de BSF avec 10% et 15%, mais sa valeur est toujours inférieure à la limite de RAS après 28 jours dans le mélange qui contient 0% de SG (5PC+0SG). La diminution de l'expansion pourrait être due à la réaction pouzzolanique de la PC, qui consomme le volume de SiO_2 et CaO contenant dans le ciment et le sable naturel par la réaction d'hydratation. Ces constatations impliquent que l'incorporation de la PC en remplacement partiel du ciment a entièrement minimisé l'effet négatif du sable naturel sur RAS. Cet effet précieux du PC semblait évident pour les mélanges contenant des quantités plus élevées de sable naturel.

L'analyse par le MEB a été effectuée pour déterminer la microstructure détaillée des échantillons de BSF contenant 5PC+50SG et 15PC+50SG. Les images de BSF durcis contenant 5PC+50SG et 15PC+50SG pendant 28 jours de durcissement sont présentées dans les figures IV.26 et IV.27 respectivement.

Concernant les échantillons de BSF avec (5PC+50SG), nous avons remarqué que l'échantillon présentait un volume très important de l'expansion par le gel expansif et sont affectés par la RAS. Le gel occupe les vides et les interfaces entre la pâte de ciment et les particules de granite, et se propage à travers la pâte de ciment ce qui développe une microfissuration considérable (figure IV.26), On remarque aussi, pour la composition de (15PC+50SG), peu de vides à l'intérieur du béton, ce qui explique la formation d'un volume faible de l'expansion par le gel expansif à l'intérieur de la matrice cimentaire (figure IV.27).

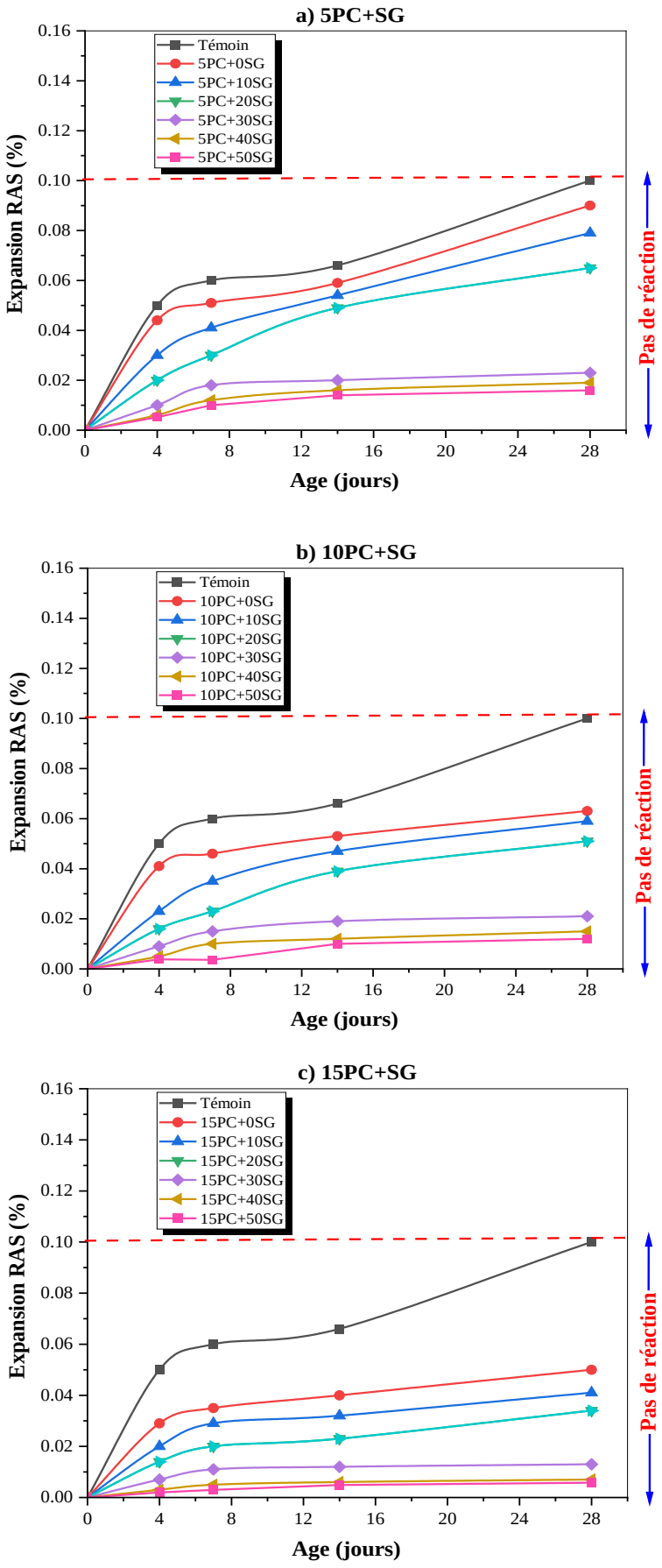


***Figure IV.25** : Réaction alcali silice des différents BSF.*

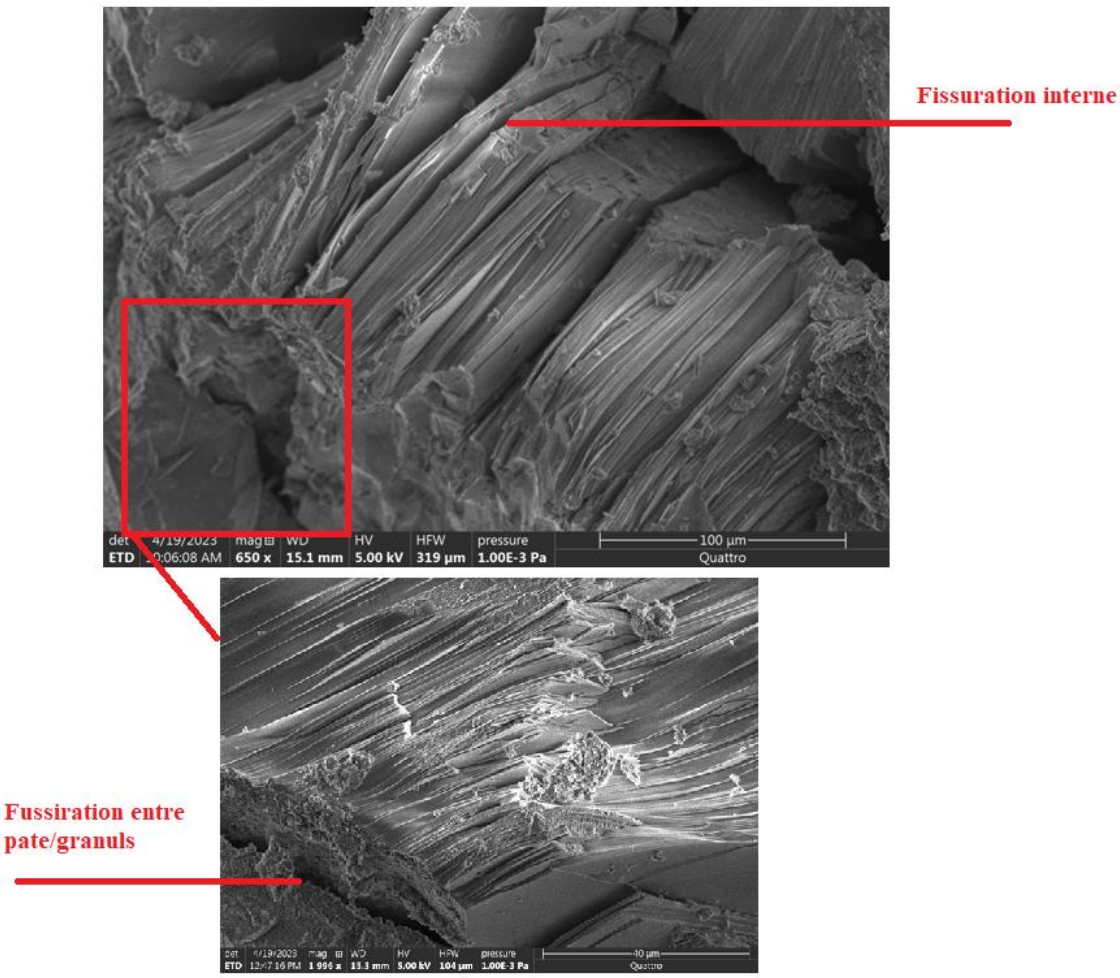


Figure IV.26 *:Observations par le MEB de BSF à base de 5PC+50SG après RAS.*

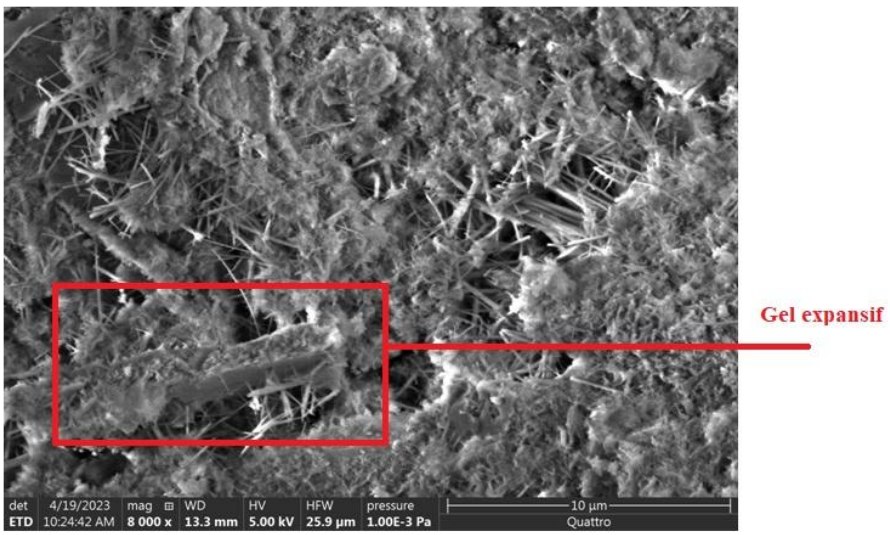


Figure IV.27 *:Observations par le MEB de BSF à base de 15PC+50SG après RAS.*

IV.2.13. Pénétration des ions chlorures

La résistance à la pénétration des ions chlorures des mélanges de BSF était déterminée selon la norme ASTM C-1202 **[283]**. La figure IV.28 présente les résultats de la résistance à la pénétration des ions chlorure en termes de la charge électrique passée (en Coulombs) à travers les échantillons cylindriques de BSF à l'âge de 90 jours du durcissement. D'après les résultats présentés dans cette figure, on remarque que pour tous les mélanges de BSF, les valeurs obtenues de la charge électrique passée se situent entre 800 et 1600 C, qui pourraient être classées dans la zone excellente et très bonne selon les recommandations de la norme ASTMC1202 **[283]**.

La figure IV.28 montre que, le remplacement partiel du sable naturel par le SG entraîne une diminution considérable de la pénétration des ions chlorure. Le mélange de BSF de référence (BSFT) présente une profondeur de pénétration plus élevée par rapport aux d'autres mélanges (1594 C). On voit aussi que par rapport au BSFT, la pénétration des ions chlorure des mélanges contenant 50% est la plus faible. Cela peut être dû au fait que le SG est relativement moins perméable que le sable naturel, et au faible volume des pores entre la pâte cimentaire et les particules de SG en raison de la texture plus rugueuse. Ces faible volume des pores permettent la diffusion progressive des ions chlorure difficilement dans le béton, ce qui diminue finalement la profondeur de pénétration des ions chlorure.

L'effet positif de l'ajout de la PC dans la composition des mélanges de BSF est clairement visible sur la figure IV.28. Cependant, en raison d'une augmentation du pourcentage de la PC, nous avons observé une amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorure des mélanges de BSF. De plus, les mélanges de BSF contenant 5, 10 et 15% de PC et 50% de SG (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG) montrent une réduction de la profondeur de la pénétration des ions chlorure passant de 898.66 C, 801.78 C et 988.4 C, avec un ordre d'amélioration de 43.62%, 49.70% et 37.99% respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC + 0SG). La plus forte réduction étant observée pour les mélanges à base de 10% PC. Cette amélioration peut être expliquée par la finesse élevée de la PC (8000 cm^2/g) qui diminué la taille des pores en termes de l'effet de remplissage, et a également rempilé les pores et donc donné une microstructure de BSF plus dense et, par conséquent, faible perméabilité vis –à-vis de la pénétration des ions chlorure.

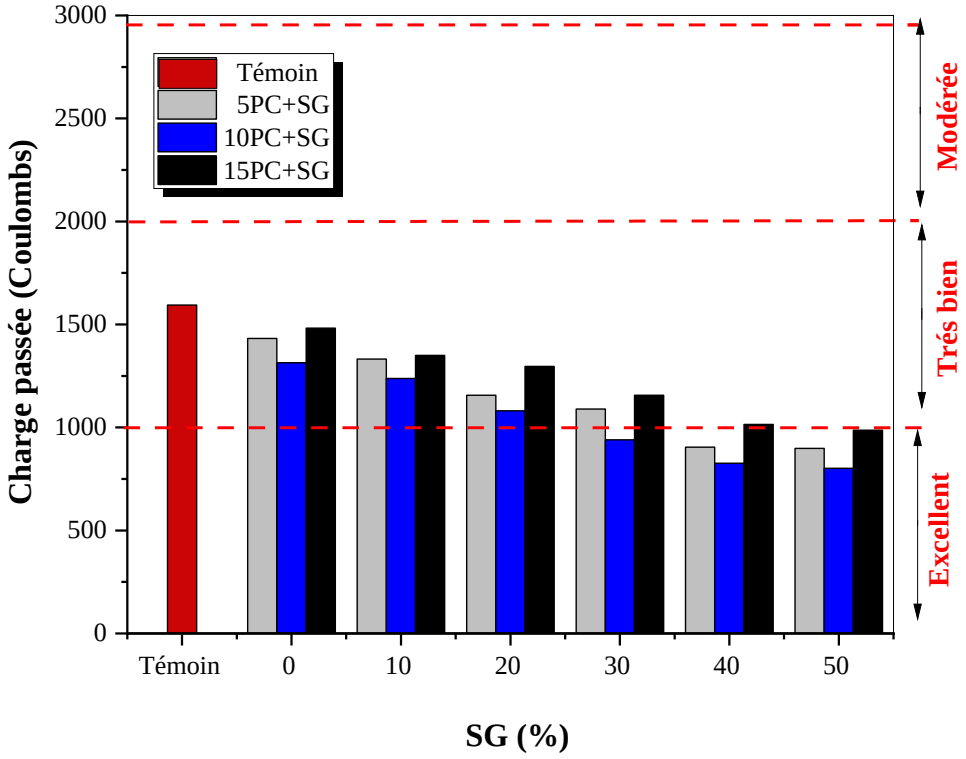


Figure IV.28 *:Pénétration des ions chlorures des différents BSF.*

L'utilisation d'un pourcentage plus élevé de la PC (c'est-à-dire 15%) n'est pas toujours bénéfique pour une améliorer de la résistance à la pénétration des ions chlorures dans le béton, en raison de l'influence de dilution du clinker. L'intervalle de la limitation présentée par les spécifications de AASHTO T-277 **[284]** est affiché sur la figure IV.28. Cette classification indique que tous les mélanges de BSF étudiés à l'exception du BSF témoin se sont révélés être dans la catégorie de «faible perméabilité aux ions chlorure». Donc comme conclusion, en peut dire que l'utilisation combinée de la PC avec le SG donne un effet positif sur de la résistance à la pénétration des ions chlorure de BSF.

IV.2.14. Résistance aux attaque d'acide

La résistance aux milieux acides est une propriété chimique qui donne un bon indicateur de la durabilité du béton contre les milieux agressifs. La résistance aux attaques des acides dépend de nombreux facteurs tels que la nature de l'acide et sa concentration, le type de matériau (composition) et son volume de porosité. La résistance aux attaques d'acide chlorhydrique (HCL) de déférents mélanges de BSF modifiée par la PC et le SG est déterminée en termes de la perte de masse, de la perte de résistance à la compression et d'un

examen visuel des échantillons du BSF immergé dans une solution de HCL avec une concertation de 5% pondant 180 jours.

IV.2.14. 1.Perte de masse

Les résultats de la perte de masse vis–à-vis de l'attaque d'acide des différents échantillons du BSF obtenus sont représentés sur la figure IV.29 (a, b et c). Les résultats obtenus dans cette figure ont montré clairement que le volume de la substitution du sable naturel par un grand volume de SG à un taux de 50%, se comporte différemment par rapport à un taux faible de 10%. De façon générale et pour tous les mélanges de BSF, les valeurs de variation de la perte de masse sont diminuées en fonction de l'augmentation des pourcentages du SG. La perte de masse des mélanges témoin (0PC+0SG) était de 6.53 %, et diminue à 5.75 %, 5.39 % et 6.14 % pour les mélanges contenant 5, 10 et 15% de la PC combinée avec 50% de SG (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG), qui sont plus faibles que celles du BSFT de l'ordre de 11.94 %, 17.45% et 5.97 % respectivement. Ces résultats étaient également conformes que le sable de granite avait plus de résistance aux attaques des acides par rapport au sable naturel.

La figure IV.29 (a, b et c) indique aussi que, l'ajout de la PC diminue les valeurs de la perte de masse. La figure montre clairement que perte de masse du BSFT passe de 6.53 % à 3.54%, 3.01% et 4.03% avec l'incorporation de la PC au taux de 5%, 10% et 15%, respectivement. D'après les résultats, on peut conclure que les mélanges à 10% de la PC ont la meilleure résistance aux acides (faible perte de masse). Cela indique que l'ajout de la PC est plus efficace pour améliorer la résistance aux attaques d'acides des mélanges du BSF, ce qui peut s'expliquer par la faible absorption des mélanges BSF due à la grande finesse de la PC (8000 cm^2/g) qui réduit la taille des pores en raison de l'effet de remplissage, ainsi que peut être expliqué par les produits d'hydratation résultant de la réaction pouzzolanique de la PC qui réduit également la diffusion de l'acide. En outre, pour les échantillons du BSF contenant de 15% de la PC, nous avons observé que la perte de masse est plus grande par rapport ceux contenants 5 et 10% de PC, ce qui peut être expliqué par la dissolution des hydrates formées. Certains chercheurs ont étudié l'influence de l'utilisation de la poudre de coquillage sur le comportement du béton exposé à un milieu agressif, Qasem et al. **[285]** ont rapporté que l'utilisation de 10% de la PC dans le béton présente la meilleure résistance aux attaques acides par rapport à un mélange composé uniquement de ciment.

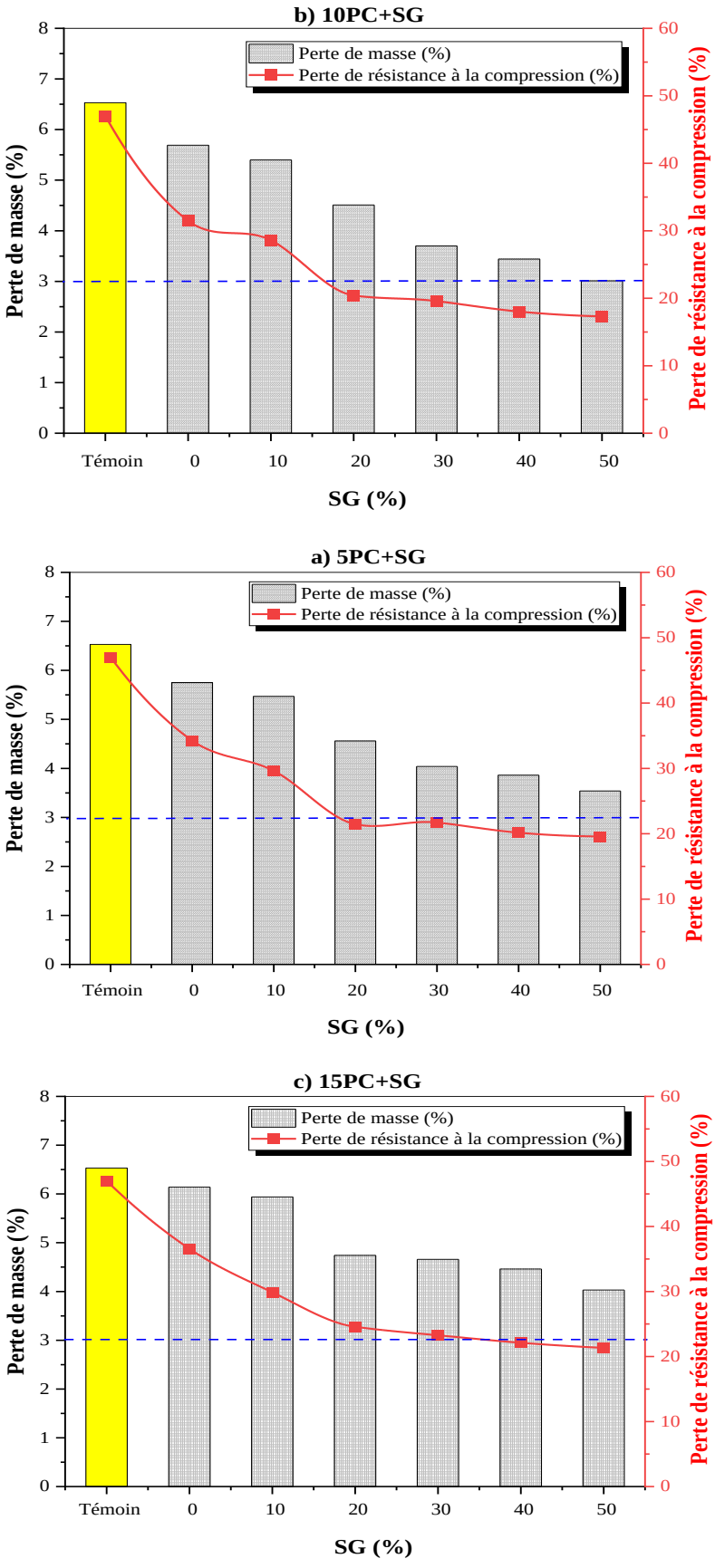


Figure IV.29 *: Perte de masse et perte de résistance des différents BSF immergé dans une solution de HCL.*

IV.2.14. 2.Perte de résistance

La figure IV.29 (a, b et c) montre la variation de la perte de résistance à la compression des échantillons de BSF contenant différents pourcentages de SG et PC et exposés à des acides (HCL). Les échantillons de BSF sont restés immergés dans l'acide chlorhydrique (HCl) pendant une période de 180 jours. Ils ont ensuite été soumis à l'essai de la résistance à la compression et comparés aux résultats de résistance à la compression obtenus pour les échantillons restés uniquement dans l'eau. Pour tout les échantillons de BSF exposés à la solution de HCl, on observe un changement de couleur, devenant bruns. Comme on peut noté d'après la Figure IV.29, la perte de résistance de tous les mélanges de BSF diminue à mesure que la substitution de SG augmente. Il a été observé que les échantillons de BSF contenant des SG présentaient une perte de résistance à la compression inférieure à celle des échantillons de BSF témoin (0PC+0SG). La perte de résistance à la compression du béton de référence (BSFT) sans PC et SG était de 47.01 %, elle est diminuée à 19.58%, 17.3% et 21.33 % a été observée pour les échantillons des mélanges de BSF contenant 50% SG avec 5%, 10% et 15% de la PC (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG), respectivement. Ces résultats montrent que la substitution du SG en remplacement partiel de sable naturel améliorent la résistance au HCL. Par rapport au mélanges de BSF contenant de 10 à 40% de SG, le mélange contenant 50% de SG s'est avéré faible en perte de la résistance à la compression, indiquant qu'il est plus durable lorsqu'il est exposé à l'acide HCl. Cela est dû à la faible vitesse de dégradation causée par la faible l'action de l'acide due à la faible action et diffusion de l'acide à travers les couches les plus denses du BSF et à la faible porosité de ce dernier. De plus, la faible diffusion de l'acide vers l'intérieur du BSF se traduit par une faible fissuration et perte de masse due à la faible consommation de portlandite (faible réaction entre l'acide et la portlandite ($Ca(OH)_2$), donc faible formation de sel de calcium.

La figure IV.29 (a, b et c) montre aussi que, l'addition de la PC en remplacement partiel du ciment diminue les valeurs de la perte de la résistance à la compression des échantillons du BSF. Le pourcentage de la perte de la résistance à la compression des échantillons du BSF contenant de 15, 5 et 10% de la PC sans SG (15PC+0SG, 5PC+0SG et 10PC+0SG et) a été diminué de 21.33%, 19.58 % et 17.3 respectivement, avec un taux d'amélioration de l'ordre 54,62%, 58.34% et 63.19% et respectivement, par rapport au mélange de référence (0PC + 0SG). Cette amélioration de la résistance au acides pourrait être liée à l'effet du remplissage où les particules de PC remplissent les micropores entre les particules de granulats et la pâte de ciment, et à la réaction pouzzolanique de la phase

amorphe (CaO) de la PC avec l'hydroxyde de calcium C-H forme un gel secondaire de C-S-H secondaire, ceci provoquant un remplissage des pores et micropores et donc développant une matrice cimentaire plus dense, par conséquence une faible porosité. Cette faible porosité donne une faible diffusion de l'acide dans l'intérieur du BSF qui se traduit par une faible réaction avec la portlandite.

En cas général sur le mécanisme de l'attaque par l'acide chlorhydrique (voir la figure IV.30), l'attaque des acides est provoquée par la réaction des acides avec la portlandite ($Ca(OH)_2$) qui entraîne la formation de sels de calcium qui, lorsqu'ils sont facilement solubles dans l'eau (Eq :IV.1), peuvent être emportés par la solution aqueuse acide, ce qui rend sa structure faible et poreuse due à la formation de chlorure de calcium ($CaCl_2$) qui provoqué une dissolution de la portlandien ainsi que le gel de C-S-H.

$$2HCl + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O \qquad \text{Eq :IV.1}$$

acide chlorhydrique — portlandite — chlorure de calcium

Les résultats de l'attaque par l'acide chlorhydrique est en accord avec les résultats de d'autres recherches. Selon Beddoe **[286]**, la vitesse de dégradation causée par l'action de l'acide est principalement contrôlée par la diffusion de l'acide à travers les couches les plus superficielles, ce qui augmente sa porosité. Si les couches internes sont plus stables, elles peuvent jouer un rôle protecteur et la déstabilisation de la pâte diminue. Nascimento et al. **[287]** affirment que, lorsque l'acide attaque la surface du ciment, il favorise une diminution de l'épaisseur du composite et la partie attaquée peut être facilement enlevée. Cependant, il provoque de grands changements dans la résistance à la compression.

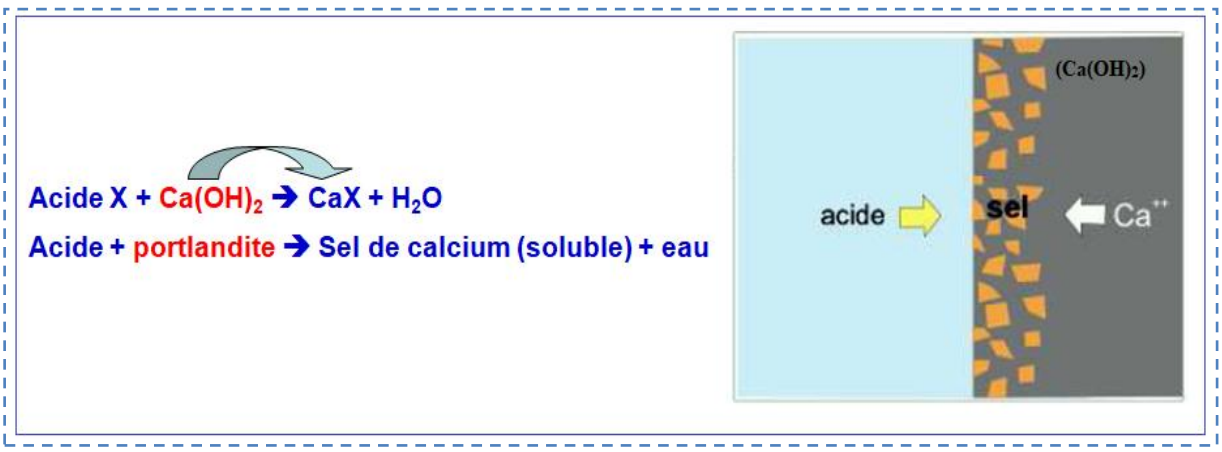


Figure IV.30 *: Mécanisme de l'attaque par les acides* **[288]**.

IV.2.14. 3.L'examen visuel

La figure IV.31 montre un examen visuel de l'état des éprouvettes du BSF contenant 5,10 et 15 % de la PC combiné avec 50% de SG (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG) en comparaison avec des éprouvettes de BSF de contrôle (0PC+0SG) après l'immersion dans une solution de HCL pendant 180 jours. On peut remarquer à partir de cette figure un changement de la couleur de toutes les éprouvettes du BSF. Cette examen visuel de l'état des éprouvettes montre que les éprouvettes du BSFT sont plus détériorées à la surface superficiel avec une grande perte de masse en comparaison avec les autre éprouvettes du BSF. Le mélange avec 10% PC sélectionné visuellement comme le mélange le plus résistant au acide.

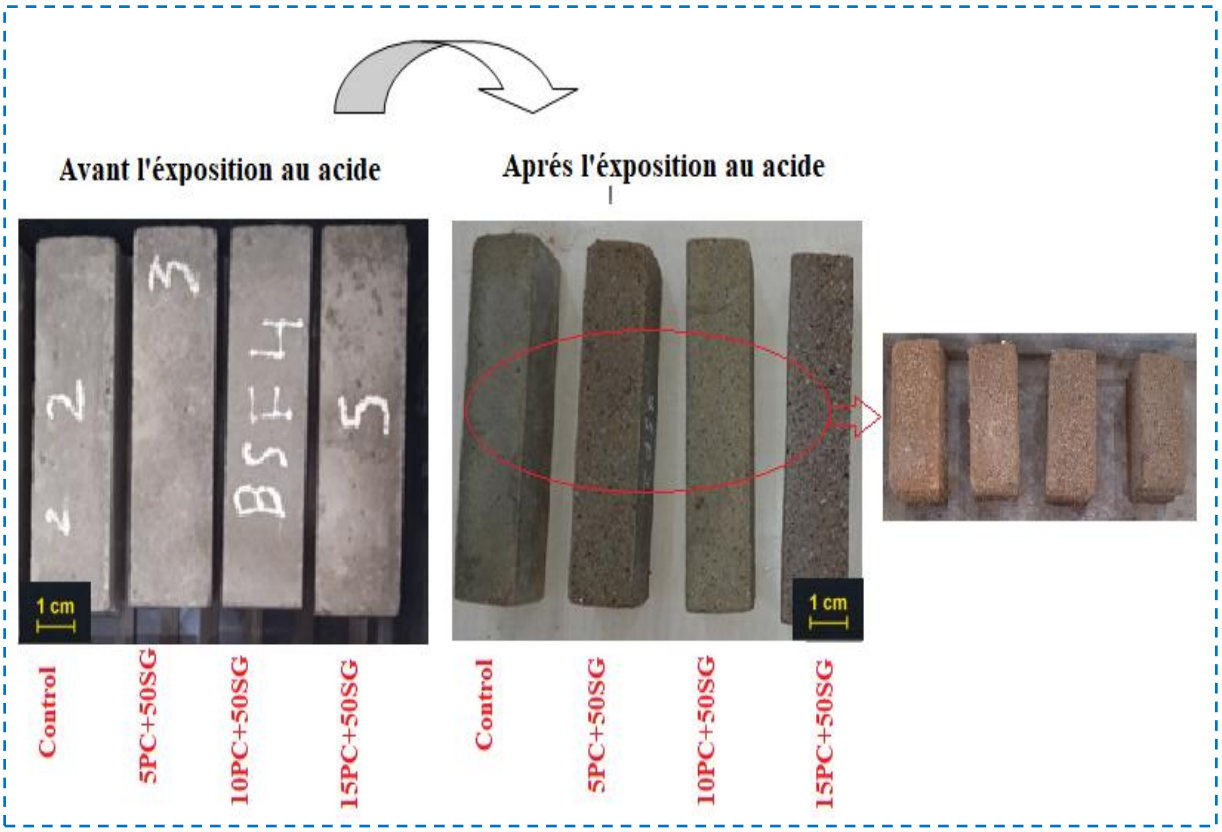


Figure IV.31 *: Etat visuel des différentes éprouvettes de BSF avant et après immersion dans une solution de HCL.*

IV.2.15. Résistance aux attaque de sulfate

La capacité de résistance aux milieux basiques est une caractéristique chimique qui donne un bon indicateur de la durabilité du béton de l'infrastructure vis-à-vis des attaques agressives. Le comportement du béton à l'attaque des sulfates dépend de nombreux paramètres tels que; la nature du sulfate et leur sa concentration, la nature du matériau (composition chimique) et sa capacité de pénétration du sulfate à l'intérieur du béton. La résistance aux attaques des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) des différents mélanges du BSF modifiée par la PC et le SG est examinée en termes de la perte de masse, de perte de résistance à la compression et d'un examen visuel des échantillons du BSF immergés dans une solution de $MgSO_4$ de 5M de concertation pondant 180 jours.

IV.2.15. 1.Perte de masse

La figure IV.32 (a, b et c) montre les observations des résultats de la variation de la perte de masse des mélanges du BSF contenant différents pourcentages de SG et de la PC après exposition au sulfate. Cette figure montre clairement que le pourcentage de la perte de masse des différentes éprouvettes de BSF avec SG et PC était inférieur à celui des éprouvettes du BSF témoin (0PC+0SG). Cet effet est peut être dû à un taux de pénétration de sulfate le plus élevé dans le BSFT. Pour les échantillons du BSF témoin (BSFT) sans PC et SG, la perte de masse était de 5.25%, elle est diminuée à 2.43%, 1.97% et 2.91 % pour les échantillons des mélanges du BSF contenant 50% SG combiné avec 5%, 10% et 15% de la PC (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG), respectivement. D'après les résultats obtenue, on peut dire que la variation de la perte de masse n'était pas beaucoup plus importante pour les échantillons du BSF contenant de la PC et du SG par rapport aux échantillons du BSF témoin.

De plus, l'incorporation de la PC a diminué la perte de masse des BSF. La perte de masse des échantillons du BSF passe de 4.79%, 4.21% et 5.01% pour les mélanges 5PC+0SG, 10PC+0SG et 15PC+0SG qui sont de 8.76%, 19.80% et 4.57% plus faibles que les échantillons du BSF témoin (0PC+0SG). En outre, il est clairement observé que les échantillons du BSF contenant 10% de la PC ont la faible perte de masse vis-à-vis de l'exposition au sulfate par rapport aux échantillons à 5% et 15% de la PC, ce qui se justifié par la faible pénétration du sulfate dans les mélanges du BSF à 10% de la PC se traduit par une faible expansion due à la formation d'ettringite, et donc une faible perte de masse **[289]**.

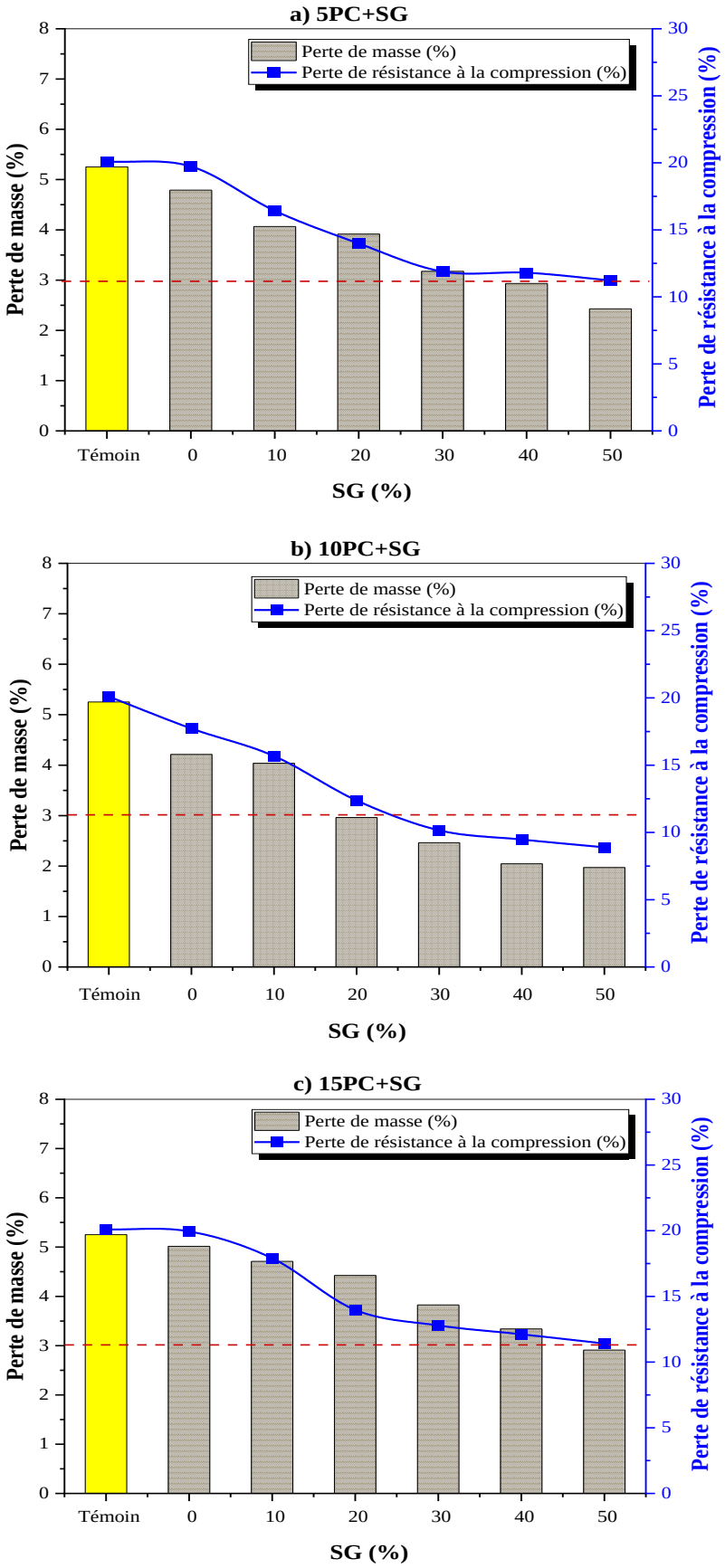


***Figure IV.32** : Perte de masse et perte de résistance des différents BSF immergé dans une solution de MgSO4.*

IV.2.15. 2.Perte de résistance

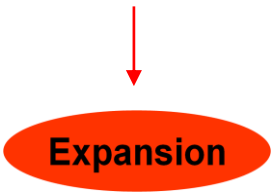
La figure IV.32 (a, b et c) montre l'évolution de la variation de la perte de résistance à la compression des échantillons du BSF contenant différents pourcentages de SG et PC après immersion dans une solution de MgSO4, en comparaison avec la perte de résistance à la compression des échantillons du BSF témoin. D'après cette figure, on peut observé que la perte de résistance à la compression de tous les échantillons du BSF contenant différents pourcentages de SG et PC maintenus dans le sulfate était inférieure à celle des échantillons du BSFT (sans PC et SG). La perte de la résistance à la compression dans les mélanges de contrôle (0PC+0SG) était de 84,81 %. En outre, la perte de la résistance à la compression a diminué à 12,50 %, 10,74 % et 17% pour les échantillons du BSF contenant de 50% de SG et 5, 10 et 15 % de PC respectivement, avec un ordre de réduction de 5%, 6% et 15% par rapport au mélange témoin. Cette perte de la résistance à la compression de tous les échantillons du BSF est attribuée à l'infiltration d'ions sulfate (SO_4^-) à l'intérieur du béton par le phénomène de l'absorption, qui pourraient entraîner la formation de gypse ($3CaSO_4.2H_2O$) dans la microstructure (Eq :IV.2) due à la réaction du SO_4^- et la portlandite, provoquant ainsi une expansion par la formation d'ettringite ($C3A.3CaSO_4.32H_2O$) (Eq :IV.3) **[290]**.

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2$$

Portlandite sulfate gypse secondaire

$$C_3A + 3CaSO_4.2H_2O + 26H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O$$

Ciment gypse secondaire (ettringite secondaire ou trisulfoaluminate



De plus, le développement de la perte de résistance à la compression à mesure que le pourcentage de la substitution du SG augmente peut être dû à la morphologie des particules de SG (surface rugueuse et forme angulaire) qui pénètre un bon accrochement entre la pâte cimentaire et les particules de SG, ce qui contribue à améliorer la ITZ entre les SG et la pâte de ciment par rapport aux particules de sable naturel qui se caractérisent par une surface lisse et une forme aronde.

Cette amélioration d'ITZ donne une bonne résistance vis-à-vis des forces de traction attribuées par l'expansion des éttringites.

Concernant l'addition de la PC dans les BSF, et d'après les résultats obtenus dans la figure IV.32 (a, b et c), on observe que les mélanges à base de 5% PC, 10% PC et 15%PC (5PC+0SG, 10PC+0SG et 15PC+0SG) présentent une perte de résistance à la compression inférieure à celle du mélange témoin. L'addition de 15% PC a augmenté la perte de résistance à la compression à l'attaque du sulfate du BSF par rapport aux 5% et 10% en raison de la microstructure poreux et de la forte porosité de la microstructure du mélange avec 15% de PC. Ce résultat confirme que l'ajout de 15% de PC engendre une pénétration plus élevée du sulfate dans l'intérieur du BSF.

IV.2.15. 3. L'examen visuel

La figure IV.33 montre l'examen visuel de l'état des éprouvettes du BSF avec 50% de SG et la PC avant et après une conservation pendant 180 jours dans une solution de MgSO4. D'après cette figure, on peut remarquer que les éprouvettes du BSF de control (BSFT) se caractérisent par écaillage, des fissures et de perte de masse plus importante en comparaison avec les éprouvettes du BSF contenant 50% de SG et la PC (5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC +50SG) causée par la génération de produits expansifs tels que le sulfate de calcium (Gypsite) et le sulfoaluminate de calcium (ettringite) été trouvée dans les éprouvettes du BSF pendant la période d'immersion dans la solution de MgSO4. Cet examen visuel de l'état des éprouvettes montre que les éprouvettes du BSFT sont plus détériorées à la surface superficielle avec une grande perte de masse en comparaison avec les autres éprouvettes du BSF.

De plus, les éprouvettes du BSF contenant 10 % en PC associés à 50 % en SG présentaient moins de résultats d'expansion sous l'attaque du sulfate de magnésium ($MgSO_4$) que les éprouvettes du BSF contenant 5% et 10 % en raison de la densification de la structure interne des éprouvettes de BSF. En peut dire que les mélanges de BSF avec 10% PC sont sélectionnés visuellement comme les mélanges les plus résistants au sulfate.

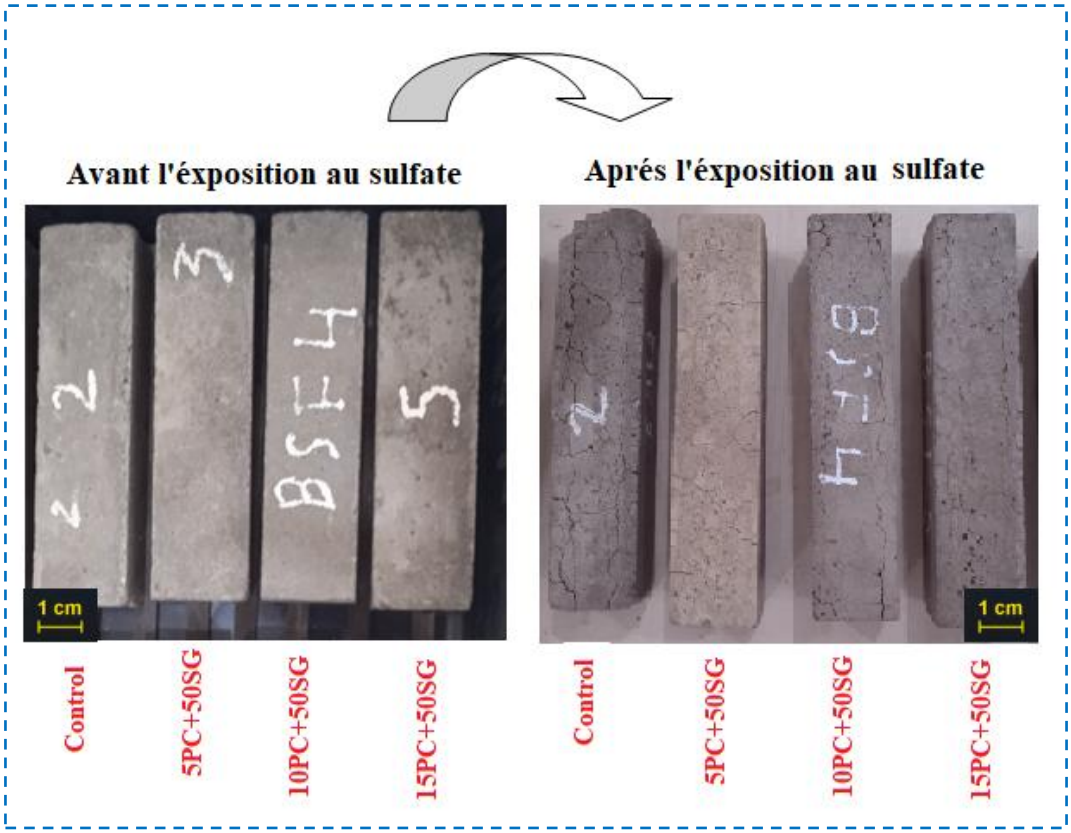


Figure IV.33 *:Etat visuel des différents éprouvette du BSF avant et après immersion dans une solution de MgSO4.*

IV.3. ANALYSE MICROSTRUCTURAL DES BSF

IV.3.1. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

L'impact de l'incorporation de la poudre de coquillage sur le processus d'hydratation des mélanges de BSF a été examiné par l'analyse DRX des échantillons durcis après 90 jours de durcissement. Les diffractogrammes DRX des échantillons du BSF de contrôle et des échantillons composés de 50 % de SG combinés à 5 %, 10 % et 15 % de PC, respectivement, sont présentés à la figure IV.34. L'analyse a été effectuée en utilisant une plage de balayage de 20 à 90° le long de deux angles thêta. Les principaux pics présentés dans les quatre mélanges du BSF sont la calcite ($CaCO_3$), l'hydroxyde de calcium ($CaOH_2$) et l'oxyde de calcium (CaO), dont l'origine est liée à la composition de la PC et aux produits d'hydratation du ciment utilisé. Cependant, les spectres DRX des gels C-S-H montrent une faible intensité de pic difficile à caractériser. Il existe une légère différence entre les spectres DRX du BSF témoin (0PC+0SG) et des mélanges contenant de la PC, à l'exception des pics de portlandite

($Ca(OH)_2$), d'oxyde de calcium (CaO) et de calcite ($CaCO_3$). Le calcium se trouve sous forme pure et hydratée en tant qu'oxyde de calcium et hydroxydes de calcium dans les mélanges du BSF, qui contribuent à la formation d'un réseau durci et donnent lieu à une résistance élevée **[291]**. Selon Okoro et al. **[292]**, l'hydroxyde de calcium, formé par la combinaison de l'oxyde de calcium (CaO) et de l'eau (H_2O) pendant l'hydratation, augmente la résistance mécanique. La figure IV.34 a montré que l'intensité du pic de $Ca(OH)_2$ a d'abord augmenté puis diminué avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la PC de 0 à 15 %.

Les niveaux de $Ca(OH)_2$ dans les BSF avec 10 % de la PC et 50 % de SG étaient plus intenses que ceux du mélange avec 15 % de la PC et 50 % de SG. En outre, la portlandite s'est formée en tant que produit primaire du processus d'hydratation avec les gels C-S-H **[293]**. Jusqu'à 10% de substitution du ciment, l'ajout de la PC aux BSF augmente la formation de portlandite ($Ca(OH)_2$) et d'oxyde de calcium (CaO), et par conséquent, la cristallinité du mélange augmente, en raison de la réaction de l'oxyde de calcium (CaO) avec l'eau et le SiO_2 pour générer du C-S-H et du CH. La recherche indique que l'ajout de la poudre de coquillage au ciment mélangé permet d'obtenir une nouvelle matrice cimentaire hydratée dont la cohésion et l'intégrité sont améliorées. La PC augmente la précipitation des produits d'hydratation, en particulier la portlandite et le gel C-S-H, en améliorant ainsi la matrice cimentaire hydratée, ce qui pourrait s'expliquer par une augmentation de la résistance **[294, 295]**.

Avec des concentrations plus élevées de PC dans les mélanges du BSF, la portlandite et les phases ressemblant à C-S-H deviennent plus visibles. Cependant, une incorporation excessive de PC (15%) a entraîné un manque de SiO_2 et d'eau, avec un excès de CaO. Par conséquent, l'intensité élevée de $Ca(OH)_2$ dans les BSF à base de PC, illustrée dans la figure IV.34.A, est responsable de sa meilleure résistance mécanique par rapport au BSF témoin, ce qui est cohérent avec les résultats de la résistance à la compression et les conclusions d'Oyebisi et al. **[296]**. De plus, le principal facteur causant l'augmentation des niveaux d'oxyde de calcium (CaO) dans les BSF à base de PC est la présence élevée de CaO dans le ciment, étant donné qu'il constitue la majorité des PC.

D'après la figure IV.34B, la substitution croissante de PC diminue la formation de calcite ($CaCO_3$), le pic le plus bas étant observé dans les mélanges contenant 15% de PC (15PC+50SG). Selon Abouelnour et al. **[297]**, la carbonatation partielle de la portlandite entraîne une diminution de ses niveaux par rapport au BSF de contrôle (0PC+0SG).

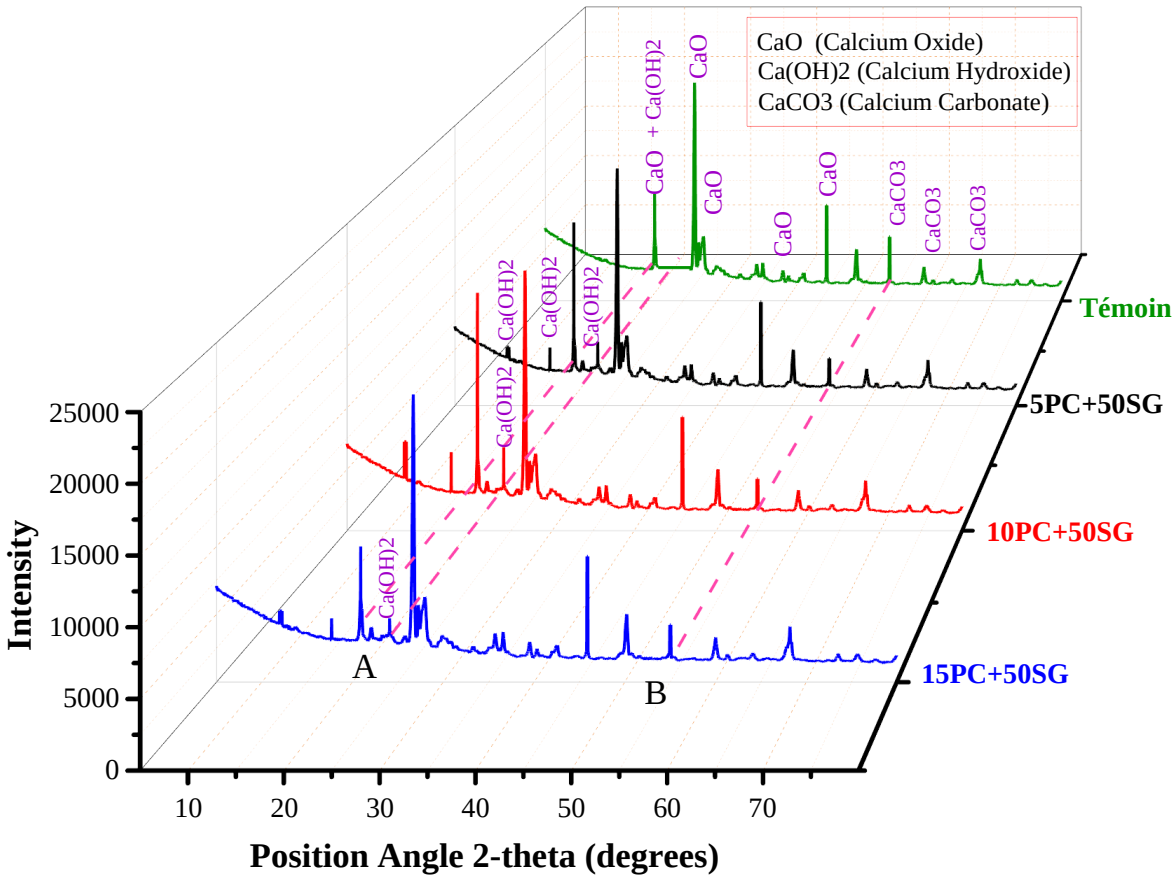


Figure IV.34 *: Diffractogrammes DRX du BSF témoin et des BSF avec 50 % de SG combiné avec 5, 10 et 15 % de PC.*

IV.3.2. Analyses thermogravimétrique et thermique différentielle (ATG/ATD)

Afin d'évaluer le comportement des mélanges du BSF à différentes températures, en particulier pour identifier les différentes phases cristallines présentes dans l'échantillon, une analyse thermogravimétrique (ATG) et une analyse thermique différentielle (ATD) ont été proposées dans cette étude. La figure IV.35 montre les courbes ATG/ATD des mélanges du BSF témoin, 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG après 90 jours de durcissement. Selon la norme ASTM C1872 **[298]** et les courbes dérivées de l'analyse thermogravimétrique (ATG) (figure IV.35), il existe trois phases primaires dans les produits d'hydratation du ciment. La première phase se situe entre 100 et 400 °C, où la réaction de déshydratation de C-S-H a lieu. La deuxième phase se situe entre 400 et 600 °C et est due à la déshydroxydation de la portlandite. La dernière se situe entre 600 et 1000 °C et représente la décarbonatation du $CaCO_3$ **[299, 300]**.

La figure IV.35 montre que la forme des courbes d'ATG du mélange BSFT et des mélanges du BSF avec 50 % de SG et différentes teneurs en PC est essentiellement comparable, ce qui suggère que les produits de la réaction sont essentiellement identiques. Les pertes de masse constatées à 100°C sont associées à l'évaporation de l'eau libre **[301, 302]**.

A 150°C, environ 15% du poids total du béton a été perdu pour tous les BSF testés, ce qui peut être associé à la perte d'eau combinée des phases C-S-H et CH **[303, 304]**. De même, Yang et Jang **[305]** ont détecté des pertes de poids notables lors de l'essai ATG entre 0 et 150°C en remplaçant 5 %, 10 %, 15 % et 20 % du ciment par des coquillages dans du laitier activé par des alcalins. Ils ont lié ce phénomène à la décomposition des produits d'hydratation primaire des matériaux cimentaires, en particulier les gels C-S-H. La liaison oxygène des composés ciment-gel (C-S-H et CASH) a été rompue. Les quatre mélanges du BSF (0PC+0SG, 5PC+50SG, 10PC+50SG et 15PC+50SG) testés présentent une perte de poids évidente entre 150 et 400 °C, qui peut être associée à la perte d'eau de la phase d'hydroxyde de calcium. Néanmoins, il existe une différence remarquable entre les pertes de masse des BSF à base de 15% de PC et les autres mélanges à des températures comprises entre 150°C et 400°C. Il en résulte une diminution de la masse du mélange à 300°C de 20% pour les BSF témoins et les BSF à 5% de PC, de 21% pour les BSF à 10% de PC et de 23% pour les BSF à 15% de PC.

La raison principale est la plus faible activité de la poudre de coquillage que le ciment. Le silicate actif impliqué dans la réaction d'hydratation diminue, les produits d'hydratation diminuent et le taux de perte de poids augmente, ce qui est cohérent avec les résultats des analyses DRX et de la résistance à la compression. Le poids de tous les mélanges du BSF diminue considérablement de 28% lorsque la température passe de 400 à 500°C en raison de l'apparition de la portlandite, qui entraîne la décomposition de l'échantillon, ce qui est en accord avec les conclusions de Tayeh et al **[32]**. En outre, une légère variation de la perte de poids a été constatée entre 500 et 600 °C pour tous les mélanges de BSF, ce qui est conforme aux résultats de Tayeh et al. **[32]**.

Au-delà de 600 °C, les BSF avec 10 et 15 % de PC ont montré une perte de poids de moins de 30 % par rapport au BSF témoin et aux BSF à base de 5 %PC. Le pourcentage de perte de poids a augmenté régulièrement en raison de l'augmentation des taux de température, et atteignant jusqu'à 43,3 % pour le BSF témoin et le BSF avec 5 % de PC et 35 % pour les BSF avec 10 et 15 % de PC à 1000 °C. De même, Hamada et al. **[254]** ont constaté une perte

de poids supérieure à 40 % pour les bétons à base de coquillages à des températures comprises entre 670°C et 800°C en raison de la décomposition complète des carbonates **[306]**. Cette constatation confirme les résultats des essais de DRX et est conforme aux résultats de Gong et al. **[307]**, Felipe-Sese et al. **[308]**, et Wang et al. **[309]**, en suggérant que la calcite dans la PC peut prendre part au processus d'hydratation des ciments à un stade précoce. Cela indique qu'en plus des composés résultant de la réaction d'hydratation primaire comme le montrent les analyses DRX (Figure IV.34), la poudre de coquillage contribue à la réaction chimique qui aboutit à la formation de calcite ($CaCO_3$) et à l'accumulation de la portlandite.

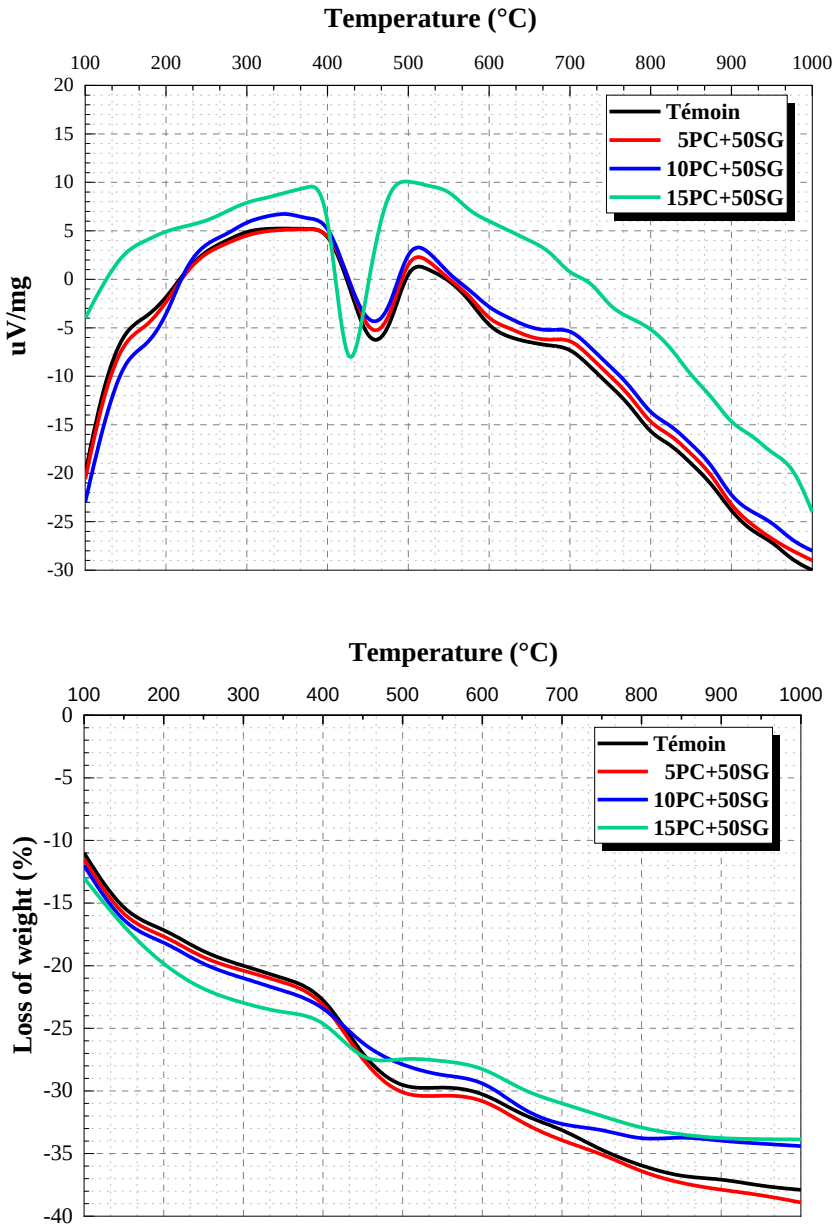


Figure IV.35 *:Diffractogramme ATG/ATD du BSF témoin et des BSF contenant 50 % de SG et 5, 10 et 15 % de PC.*

IV.4. CORRELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DU BSF À L'ETAT DURCI

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 BSFP 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 cimentaire.

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

La méthode de la VAS (Vitesse d'Auscultation Sonique) permet la possibilité d'évaluer divers aspects du béton, tels que son homogénéité ainsi que la présence de fissures et de vides. De plus, elle permet de déterminer la résistance à la compression d'une structure existante sans recourir à des essais invasifs comme le carottage, qui pourraient affaiblir l'élément en béton. La figure IV.36 montre résultats de la VAS est exprimée en fonction de la résistance à la compression des différents BSF correspondantes à l'âge de 90 jours. Il a été observé d'après cette figure que le lien entre la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique des BSF suit un modèle mathématique linéaire.

$$RC = a.VAS + b \qquad \text{Eq :IV.4}$$

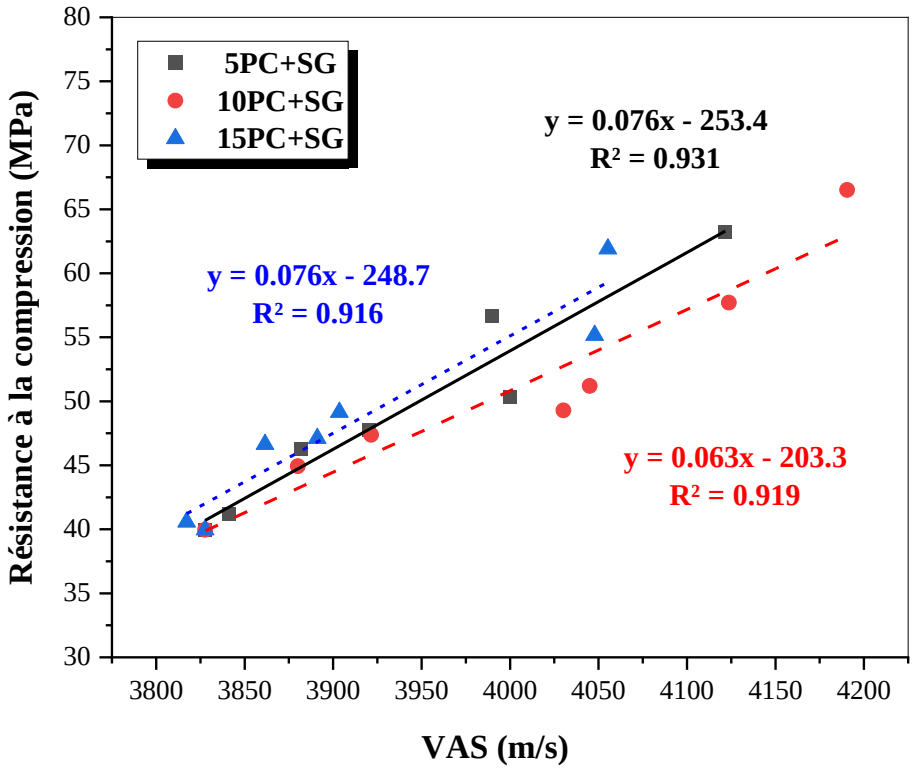


Figure IV.36 *:Corrélation entre la résistance à la compression et VAS des déférent BSF.*

En effet, cette relation implique que lorsque la vitesse d'auscultation sonique ou dynamique augmente, la résistance à la compression tend également à augmenter. Ulucan et al. **[249]** ont constaté que le même modèle est adapté aux BAP fabriqués avec la fumée de silice et des cendres volantes. Il est intéressant de noter que la majorité des expressions empiriques reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels ne suivent pas une relation linéaire. La figure IV.36 illustre les courbes de corrélation établies entre les résistances à la compression et les vitesses d'auscultation sonique des mélanges du BSF contenant le SG et la PC. Cette figure met en évidence une corrélation linéaire satisfaisante est observée pour toutes les séries (5PC+SG, 10PC+SG et 15PC+SG) avec des coefficients de corrélation (R^2) supérieurs à 0,9, ce qui indique une excellente relation linière entre ces deux propriétés.

IV.4.2. Corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité

La variation des résultats du module d'élasticité est représenté en fonction de la variation des résistances à la compression des déférent mélanges du BSF à l'âge de 90 jours de durcissement est représentée dans la figure IV.37. Ces deux paramètre varient en fonction de la substitution de la PC et du SG. D'après cette figure, en remarque une augmentation de la résistance à la compression associée à une augmentation du module d'élasticité.

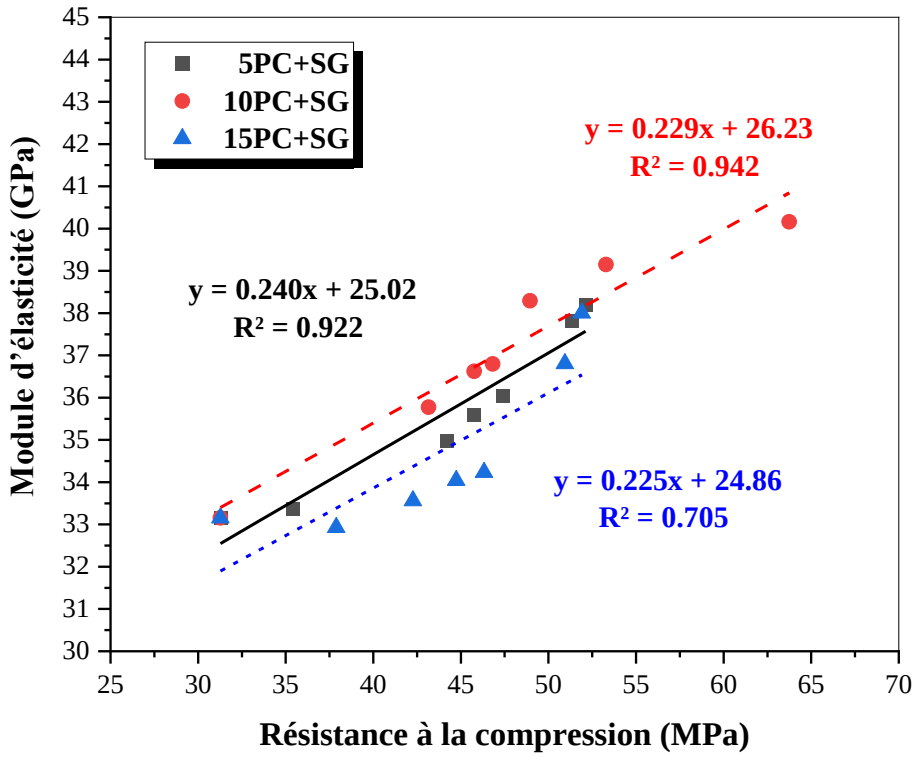


Figure IV.37 *:Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.*

La variation du module d'élasticité avec la variation de la résistance à la compression est clairement linéaire et correspond à des investigations menées par des coefficients de corrélation R^2 de 0,92 et 0,94 pour les séries de 5PC+SG et 10PC+SG respectivement. Cependant, la série de 15PC+SG montre un coefficient de corrélation moyen (R^2 = 0,70). Cette disparité des coefficients de corrélation peut être attribuée aux variations de la microstructure du béton résultant de l'utilisation de différents types de matériaux et de paramètres de conception du mélange. Enfin, on peut déduire que le module d'élasticité des déférents mélanges du BSF dépend directement de la résistance à la compression.

IV.4.3. Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité

La variation de la porosité accessible à l'eau des déférent mélanges du BSF à base de la teneur en PC et de SG est représenté sur la figure IV.38 en fonction de la résistance à la compression.

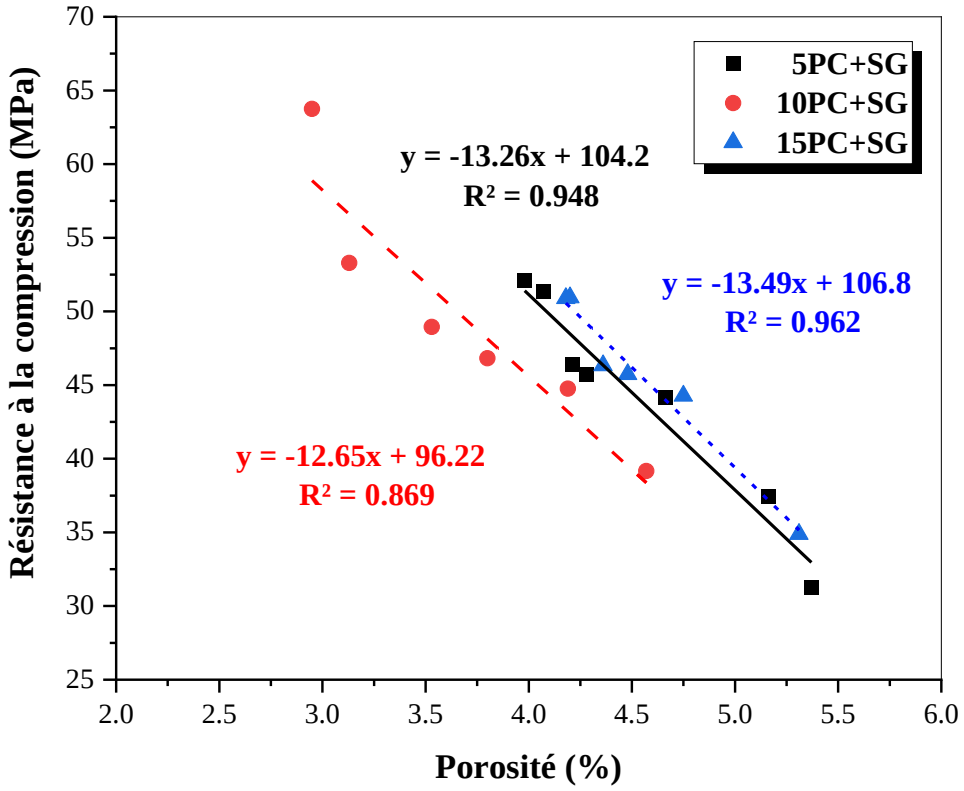


Figure IV.38 *:Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité des défèrent BSF.*

D'après la figure IV.38, on peut constater que la variation de la porosité avec la résistance à la compression suit clairement une relation linéaire, comme s'accorde par des investigations menées. Les coefficients de corrélation (R^2 = 0,94-0,86 et 0,96) indiquent une bonne corrélation entre la porosité et la résistance à la compression. Sur ce graphique, il est n'est observé que la relation entre la porosité et la résistance à la compression significativement influencée par l'utilisation de la PC et/ou de SG. Les mélanges sans SG ou avec la PC semblent présenter des résistances élevées pour une porosité donnée, tandis que les mélanges combinant la PC et le SG montrent des résistances encore plus élevées pour une porosité donnée. Ces différences ne sont cependant que faibles et on peut conclure que pour les résultats disponibles, le volume de SG et le taux de PC utilisé influent significativement sur la relation résistance- porosité du béton.

IV.4.4. Corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration aux ions chlorures

La figure IV.39 présente la relation entre la résistance à la compression et la charge totale passée à travers l'échantillon des BSF contenant le SG et la PC à l'âge de 90 jours.

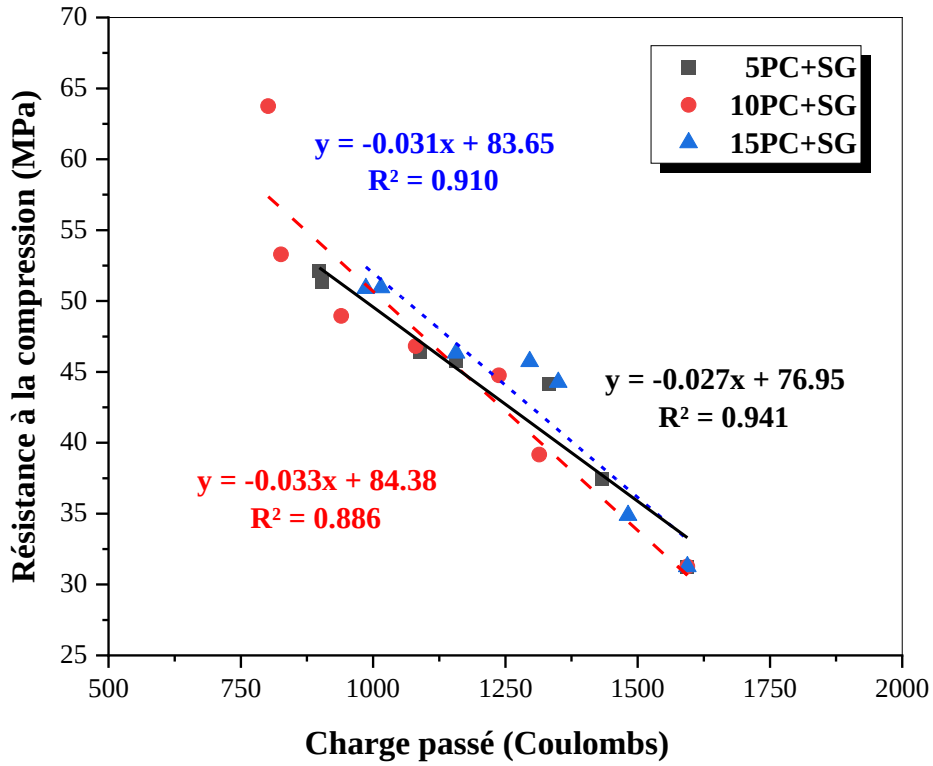


Figure IV.39 *:Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité aux ions chlorures des défèrent BSF.*

D'après cette figure, on peut constaté que une diminution de la résistance à la compression est associée à une augmentation de la charge totale passée pour tout les mélanges du BSF. Une bonne corrélation linéaire est donc observée pour les séries de 5PC+SG et 15PC+SG, avec des coefficients de corrélation (R^2) de 0,94 et 0,91 respectivement. Cependant, la série 10PC+SG présente un coefficient légèrement inférieur de corrélation, soit $R^2 = 0,88$. Cela peut être attribuée aux variations de la microstructure du BSF résultant de l'utilisation de différents types de matériaux et de paramètres de conception des mélanges du BSF. Ce résultat est en bonne concordance avec celui obtenu par Xiao et al. **[310]**. De plus, on a remarqué une tendance à la diminution de la profondeur de pénétration des ions avec l'augmentation de la résistance. Cette corrélation était forte pour toutes les séries (5PC+SG, 10PC+SG et 15PC+SG). Ils en ont conclu que la pénétration des ions chlorure dépend clairement de la résistance à la compression, ainsi que également de la microstructure de la matrice de béton (des pores).

Après l'examen des résultats de la figure IV.39, il est clair que les corrélations entre la résistance à la compression et la vitesse de la charge passée sont davantage influencées par la composition du béton ou le type de matériaux utilisés.

IV.4.5. Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité

La figure IV.40 présente la relation entre la porosité et la perméabilité aux ions chlorures (en termes de la charge passée) des mélanges de BSF contenant de la PC et du SG. D'après cette figure, on observe des coefficients de corrélation élevés pour toutes les séries du BSF, qui se situent entre $R^2 = 0,91$ et 0,99 du type linéaire. Cependant, il est remarqué que la charge totale passée a tendance à augmenter avec l'augmentation du pourcentage de la porosité totale.

Le fort coefficient de corrélation ($R^2 = 0,99$) pour la série de 10PC+SG s'explique par le fait que la diffusion des ions chlorures ne dépend pas uniquement de la porosité totale. Elle dépend également de la tortuosité, de la surface spécifique des échantillons du BSF, de la connectivité des pores (pores interconnectés) et de la distribution granulométrique de leurs particules (sable naturel et SG) à l'intérieur de la microstructure, ainsi que des pores de la zone de transition entre la matrice cimentaire et les particules de granulats.

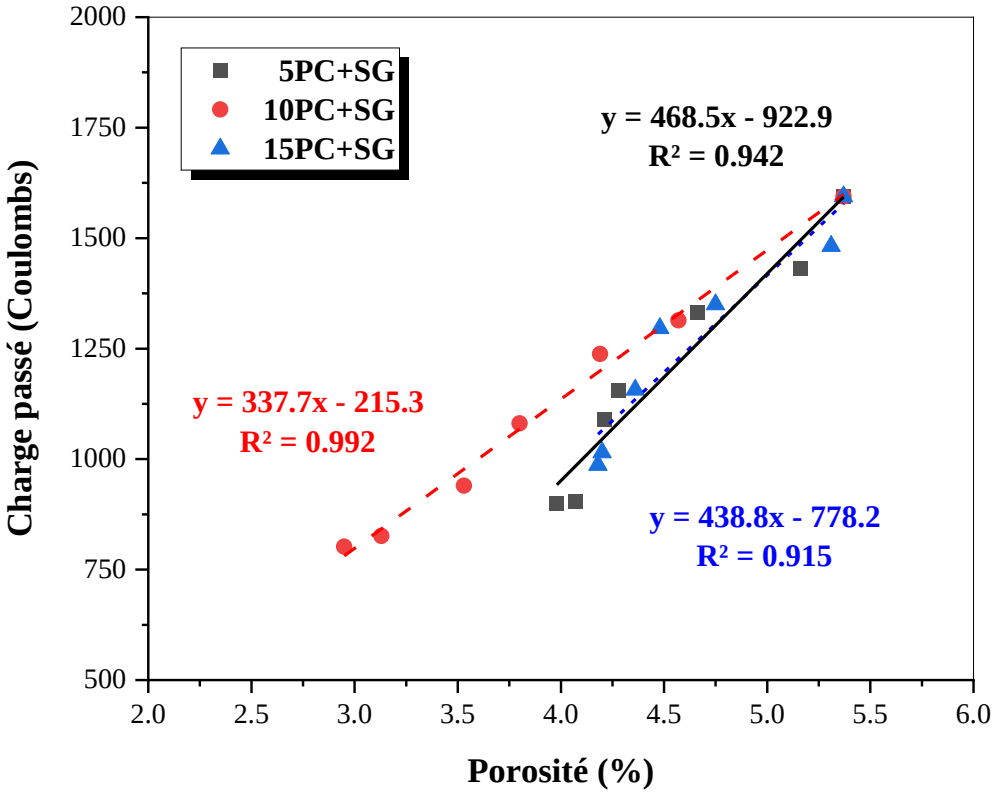


Figure IV.40 *:Corrélation entre la porosité et la perméabilité aux ions chlorures des différents BSF.*

IV.4.6. Corrélation entre l'absorption d'eau par immersion total et la porosité

Les matériaux poreux ont tendance à avoir une capacité d'absorption d'eau très importante, et inversement, bien que cette relation ne soit pas toujours constante, en raison de l'impact significatif de la distribution des vides, ainsi que de leur interconnectivité qui jouent un rôle très important dans cette équation. L'absorption d'eau par immersion totale laisse la capacité d'un matériau poreux à permettre la pénétration de l'eau à l'intérieur du béton sous l'effet du gradient de pression hydrostatique. En règle générale, ces deux propriétés sont corrélées positivement.

La figure IV.41 illustre la relation linéaire entre la porosité et le coefficient d'absorption d'eau pour les différents séries de BSF (5PC+SG, 10PC+SG et 15PC+SG). Dans cette figure, des coefficients de corrélation satisfaisants ont été observés, variant entre 0,83 et 0,95 pour la porosité totale et le coefficient d'absorption d'eau, suivant une fonction linéaire.

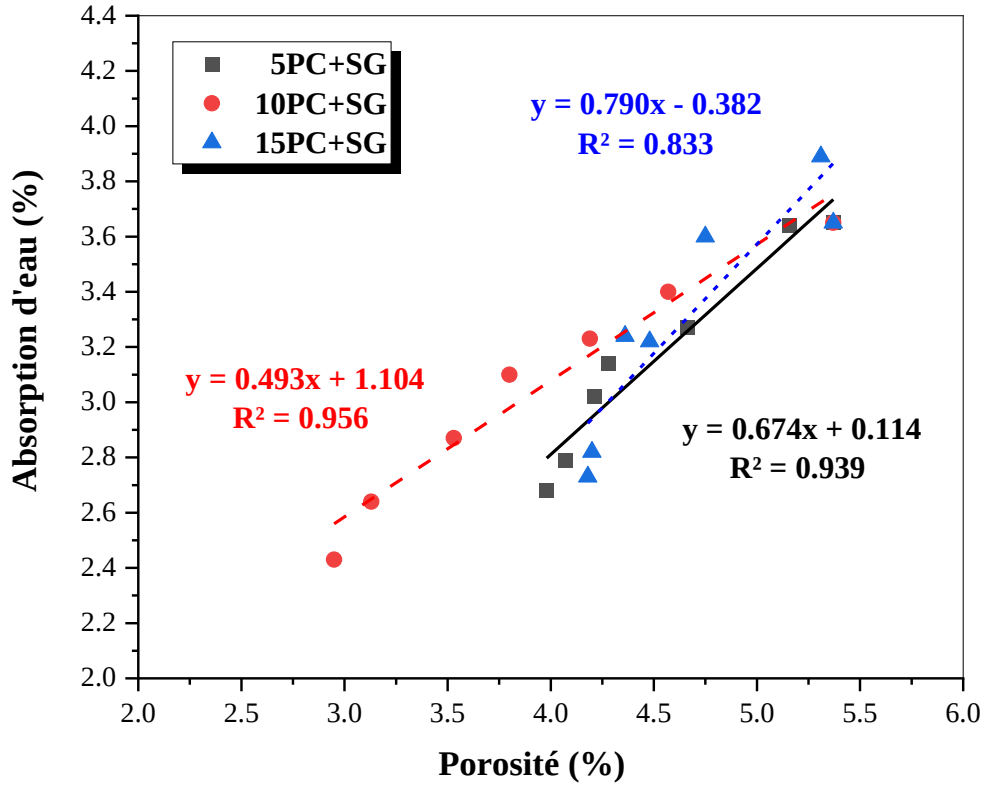


***Figure IV.41** :Corrélation entre la porosité et l'absorption d'eau des différents BSF.*

IV.4.7. Corrélation entre la résistivité électrique et la porosité

Les indicateurs de durabilité du béton peuvent être évalués en mesurant la résistivité électrique et le volume de porosité. En règle générale, la résistivité électrique est directement liée à la structure poreuse du béton. Autrement dit, une résistivité électrique plus élevée peut indiquer une porosité plus faible.

La figure IV.42 présente la relation entre la résistivité électrique et la porosité totale des échantillons de BSF fabriqués avec du SG et de la PC. On observe que l'augmentation de la porosité est associée à une diminution de la résistivité électrique. Une corrélation linéaire significative est observée pour les séries de 5PC+SG, 10PC+SG et 15PC+SG, avec des coefficients de corrélation R^2 de 0,93, 0,95 et 0,86 respectivement. Selon cette figure, on observe une relation linéaire directe entre la résistivité électrique et la porosité pour tous les BSF. On peut conclure conclu que la résistivité électrique des BSF dépend du volume de porosité dans la matrice cimentaire du béton.

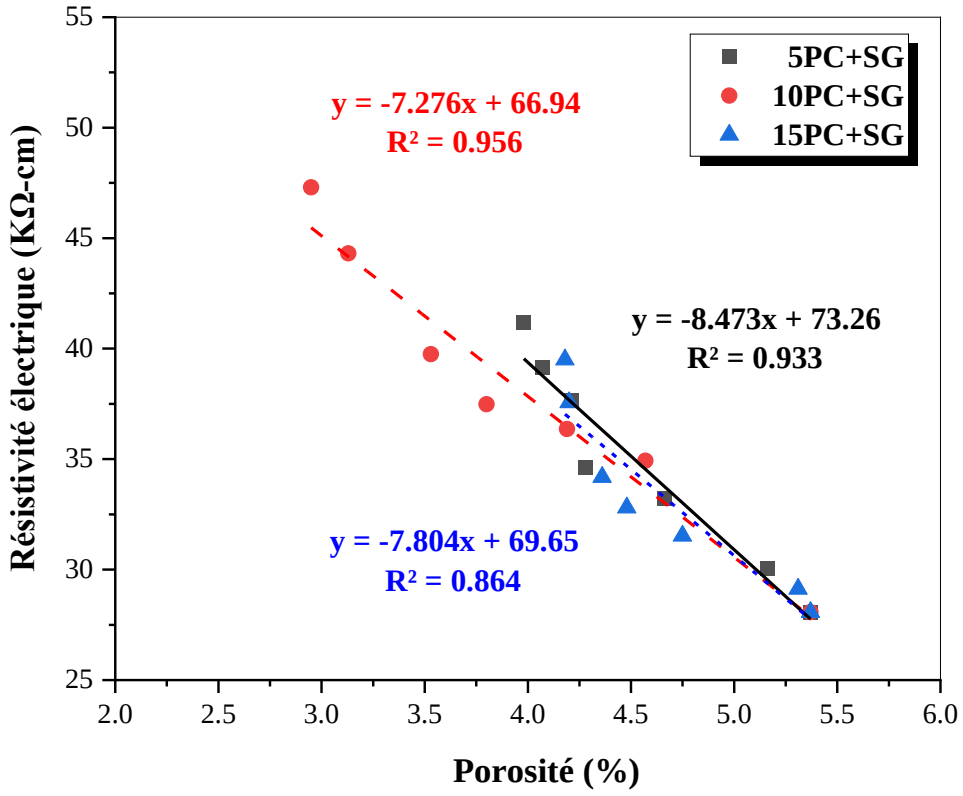


Figure IV.42 *:Corrélation entre la porosité et la résistivité électrique des différents BSF.*

IV.4.8. Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la résistivité électrique

La figure IV.43 représente les résultats de la résistivité électrique en fonction de la perméabilité aux ions chlorures pour tous les mélanges de BSF contenant de PC et du SG. D'après cette figure, on observe une bonne corrélation pour toutes les séries de 5PC+SG, 10PC+SG et 15PC+SG, avec des coefficients de corrélation (R^2) compris entre 0,94 et 0,96, indiquant une bonne relation linéaire. Cependant, la perméabilité aux ions chlorures semble diminuer avec l'augmentation de la résistivité électrique.

Les forts coefficients de corrélation observés pour toutes les séries de 5PC+SG, 10PC+SG et 15PC+SG s'expliquent par le fait que la diffusion des ions chlorures et la résistivité électrique dépendent directement de plusieurs facteurs, notamment la porosité totale, la tortuosité, la surface spécifique, la connectivité des pores et leur distribution granulométrique à l'intérieur de la matrice.

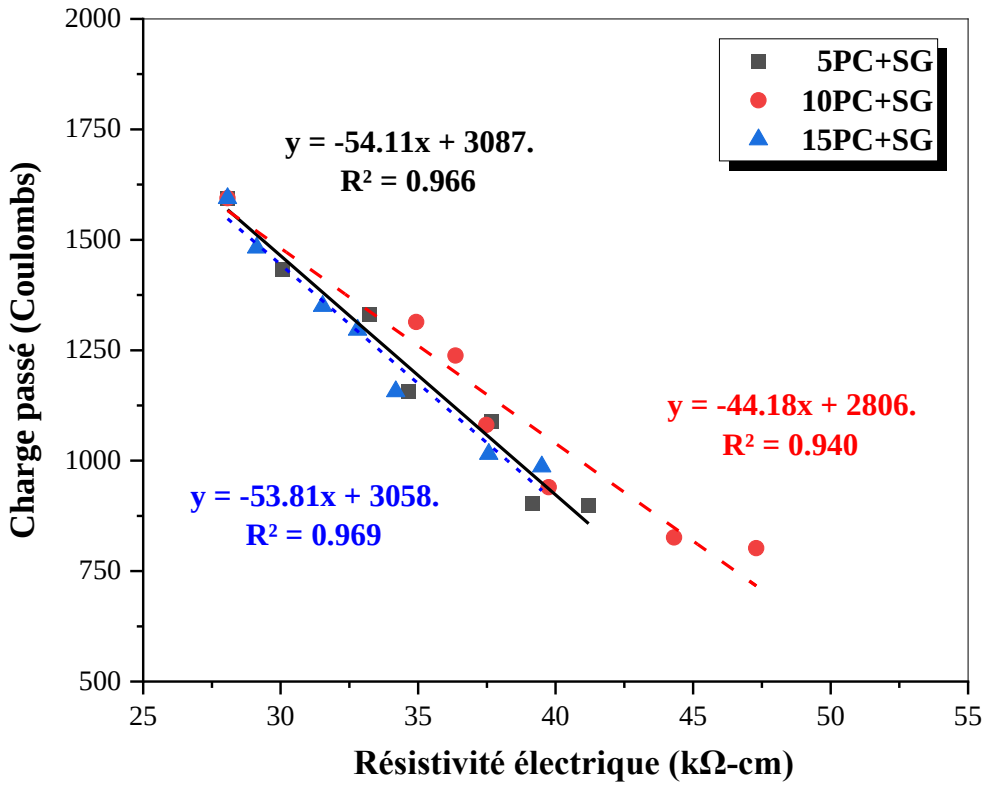


Figure IV.43 *:Corrélation entre la résistivité électrique et la perméabilité aux ions chlorures des différents BSF.*

IV.5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BSF À BASE DE SG ET PC

Au cours des récentes années, la production mondiale de ciment a progressé rapidement, devenant la troisième source d'émissions anthropiques de dioxyde de carbone après les combustibles fossiles et le changement d'affectation des terres. Le ciment, utilisé comme liant pour assembler des éléments, représente à lui seul 80 % des émissions totales de CO_2 du béton. Ce matériau contribue quant à lui à environ 6 à 7 % des émissions totales de CO_2 de la planète Shi et al. **[311]**. Cette tendance est alarmante dans le contexte actuel du changement climatique, d'autant plus que la demande de ciment devrait presque tripler d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 2010, atteignant 6 milliards de tonnes par an **[312]**. Comme on le sait, la fabrication du ciment et l'extraction conventionnelle des granulats naturel entraînent des émissions de CO_2 substantielles par rapport aux autres éléments du béton, contribuant ainsi de manière significative aux émissions globales provenant des activités énergétiques et industrielles. Tout au long de son cycle de vie, la production de béton passe par trois phases principales, comme l'illustre la figure IV.44. L'évaluation de l'empreinte CO_2

dans cette étude se limite à la production de ciment (en particulier, la production de clinker), aux phases d'extraction des granulats conventionnels et aux phases de transport des matériaux.

En général, l'objectif de l'évaluation des impacts environnementaux, menée de manière scientifique, est de comprendre les répercussions écologiques dès la phase préliminaire d'un projet, avant son approbation. Une évaluation tardive, par exemple pour des projets déjà en cours de réalisation, n'atteint pas ces objectifs, surtout si elle révèle des impacts défavorables sur l'environnement où ils sont implantés. Dans ce contexte, intégrer la prise en compte des impacts environnementaux permettrait de réaliser des économies significatives, notamment en mettant en place des mesures correctives, des ajustements ou des compensations.

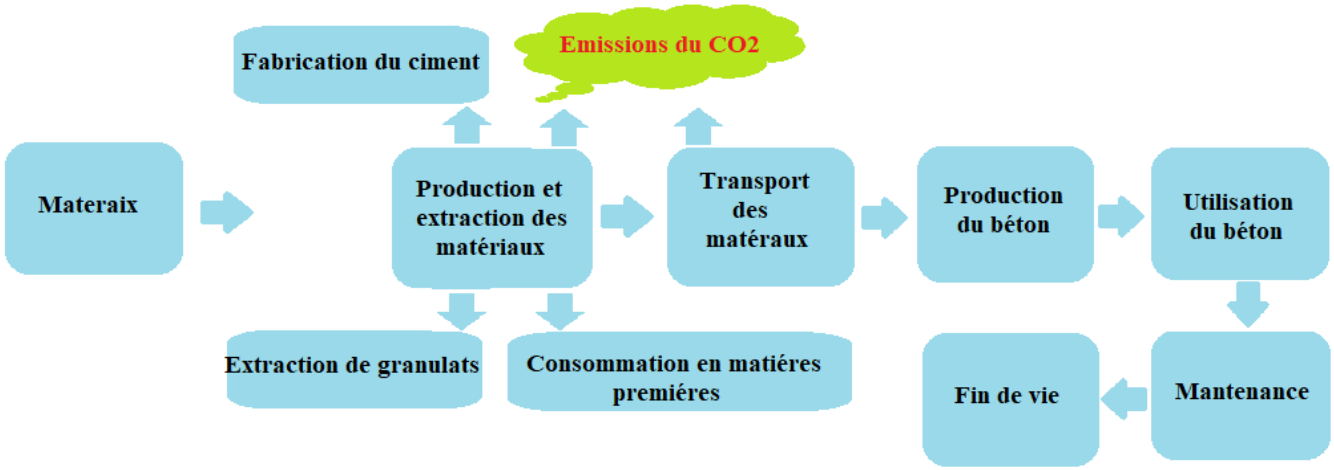


***Figure IV.44** : différentes phases du cycle de vie du béton.*

L'objectif principal de l'étude d'évaluation du cycle de vie environnemental était d'évaluer l'impact environnemental des différentes compositions de béton de sable fluide (BSF) fabriquées à partir des ciments composés (également appelés alternatives). Le périmètre du système pour l'analyse du cycle de vie a été fixé de manière à englober la production de béton, y compris toutes les phases de production telles que la phase de l'extraction des matières premières (par exemple, le sable de rivière naturel), la transformation (ciment et poudre de coquillages) et le transport des matériaux, comme le montre la figure IV.45.

Les émissions de CO_2 pendant la phase d'utilisation du béton, la phase d'entretien du béton et la phase de fin de vie du béton n'ont pas été analysées. Cette décision a été prise parce que le béton de sable fluide conventionnel (0PC+0SG) et les autres mélanges de béton de sable fluide contenant de la PC et du SG sont supposés subir des processus similaires au

cours de ces phases, ce qui entraîne des quantités égales d'émissions de CO_2. La quantité de CO_2 produite a été calculée sur la base de la fabrication d'un mètre cube de béton. La production de ciment Portland ordinaire (OPC) et l'extraction de sable naturel nécessitent également à la consommation de ressources naturelles telles que le calcaire, l'argile et le gypse, ainsi que les gisements de sable ce qui augmente le volume de la consommation de matières premières. Le volume de consommation en matières premières (en particulier le ciment et le sable naturel) est déterminé à partir des proportions décrites dans les différents mélanges de béton de sable fluide. Ces données, associées au facteur d'émission de CO_2, sont utilisées pour évaluer l'impact sur l'environnement.

Dans cette étude, les facteurs d'émission de CO_2, tirés de Sudjono et Yudhi **[313]**, sont de 1,77 kg CO_2/kg pour le ciment Portland ordinaire et de 0,37 kg CO_2/kg pour le sable de rivière naturel. En outre, d'après les conclusions de Soltanzadeh et al. **[314]**, le facteur d'émission de CO_2 pour la production de la poudre de coquillage (PC) est de 0,068 kg CO_2/kg. De plus, le facteur d'émission de CO_2, tiré d'Elena Surra et al. **[315]**, est de 0,094 kg CO_2/kg pour la phase de recyclage de déchets du granite en tant que sable.

Suwarno et al. **[316]** indiquent que la quantité d'émissions de CO_2 pendant la phase de transport des matériaux est influencée à la fois par le facteur d'émission du véhicule de transport et par la distance totale entre la source du matériau et le site de production du béton, estimée à 0,41 kg CO_2/km. Dans cette étude, on suppose que les véhicules utilisés pour le transport des matériaux ont une capacité de deux tonnes, soit 6 m^3. Étant donné que la quantité de matériaux nécessaires pour 1 mètre cube de béton est inférieure à la capacité maximale du véhicule, le nombre de trajets nécessaires pour tous les matériaux est de 1 (trajet). Il convient de noter que pour tous les mélanges de béton de sable fluide, les émissions de CO_2 calculées sont cumulées à partir des sources de ciment, de la poudre de coquillage, du sable naturel et de déchets de granite.

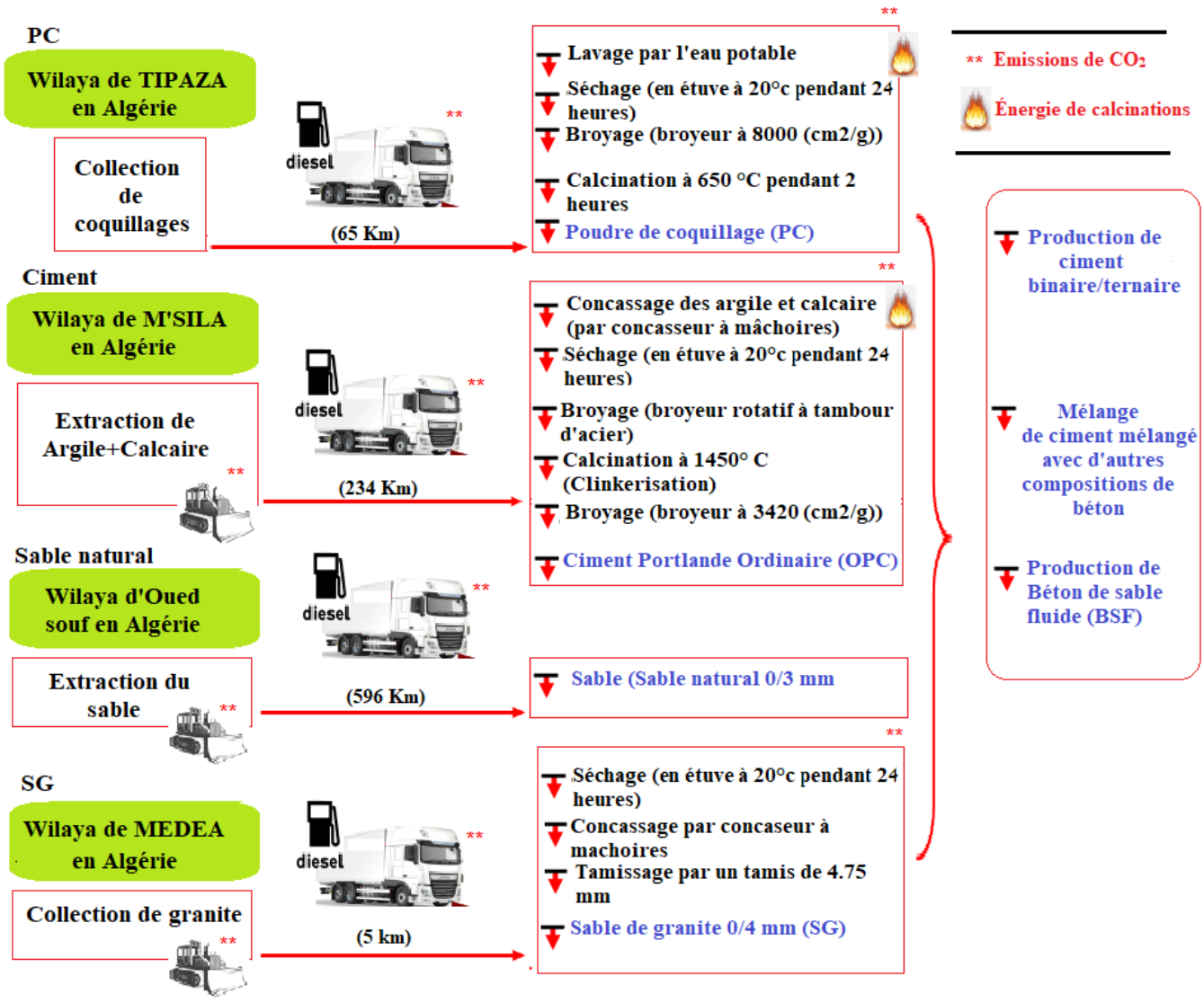


Figure IV.45 *: Processus pris en compte dans l'analyse de l'impact environnemental des différents BSF élaborés dans le cadre de cette étude.*

En outre, selon Soltanzadeh et al. **[314]** et Kavitah et al. **[317]**, la production de la poudre de coquillage (PC) nécessite moins d'énergie thermique que celle du ciment. En effet, la production d'une tonne de la PC nécessite environ 2,0.8 GJ, tandis que celle d'une tonne de ciment requiert environ 4,65 GJ. Les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère et la consommation d'énergie ont été calculées en utilisant les équations suivantes :

$$\text{Réduction des émissions de CO2 (\%)} = \frac{CO2(i) - CO2(0)}{CO2(0)} X100 \qquad \text{Eq :IV.5}$$

$$\text{Réduction de consommation d'énergie (\%)} = \frac{E(i) - E(0)}{E(0)} X100 \qquad \text{Eq :IV.6}$$

$$\text{Réduction de consommation de matériaux } (\%) = \frac{CM(i) - CM(0)}{CM(0)} X100 \qquad \text{Eq :IV.7}$$

Avec :

CO_2 (i): Quantité d'émission de CO_2 pour les déférents mélanges de BSF à base de PC et SG;
CO_2 (0): Quantité d'émission de CO_2 pour le mélange de BSF témoin (0PC+0SG).

E0: Quantité d'émergé consommé pour les déférents mélanges de BSF à base de PC (5,10 et 15%); Ei: Quantité d'émergé consommé pour les mélanges de BSF témoin (0PC).

CM (i): Consommation de matériaux pour les déférent mélanges de BSF à base de PC et SG;
CM (0): Consommation de matériaux pour le mélange de BSF témoin (0PC+0SG).

Les figures IV.46-IV.51 illustrent les résultats des quantités d'émissions de CO2 et des volumes de consommation de matières premières pour tous les mélanges de BSF. Il ressort clairement de ces figures que le volume de consommation de matières premières et la quantité d'émissions de CO_2 présentent une diminution linéaire à mesure que la proportion de la PC et du SG augmente en remplaçant partiellement le ciment et le sable naturel, respectivement. Le béton de sable de témoin (BSFT) a présenté le volume de consommation de matières premières et la quantité d'émissions de CO_2 les plus élevés, tandis que le mélange à forte teneur en PC et de SG (15PC+50SG) a présenté les valeurs les plus faibles pour les deux paramètres. Les résultats présentés dans les figures IV.46-IV.51 montrent que le meilleur impact environnemental a été observé lorsque 15 % en poids de PC et de 50% en volume en SG ont été introduits, avec 1047.41 kg/m3 d'émissions de CO_2 et 68.25% de consommation de matières premières. Les valeurs montrent une réduction de 26.12% pour l'émission de CO_2 de 31.75%pour la consommation des matières premières respectivement, par rapport au BSFT avec 100% de matières premières (100% de ciment et de sable naturel), résultant en 1423,26 kg/m3 d'émissions de CO_2.

Dans le même ordre d'idées, Soltanzadeh et al. **[314**] ont montré une réduction d'environ de 13,46 % et 13,02 % de la consommation de matières premières et des émissions de CO_2, respectivement, grâce au remplacement partiel du ciment par la PC. De plus, Peceño et al. **[318]** ont également indiqué que l'utilisation de déchets de coquillages en remplacement partiel de ciment réduisait les émissions de CO_2 de 13 %. Enfin, ces résultats soulignent les avantages potentiels de l'incorporation de la poudre de coquillages en tant que substitut du ciment et du sable de granite comme remplacement partiel du sable naturel dans la production

du BSF. Cette substitution a un impact positif sur l'environnement et réduit la quantité de déchets, en diminuant les émissions de CO_2 et la consommation de ressources naturelles. Étant donné que la poudre de coquillages (PC) et le sable de granite (SG) proviennent de déchets solides, son utilisation offre des avantages significatifs en termes de valeur ajoutée, tant sur le plan économique qu'environnemental.

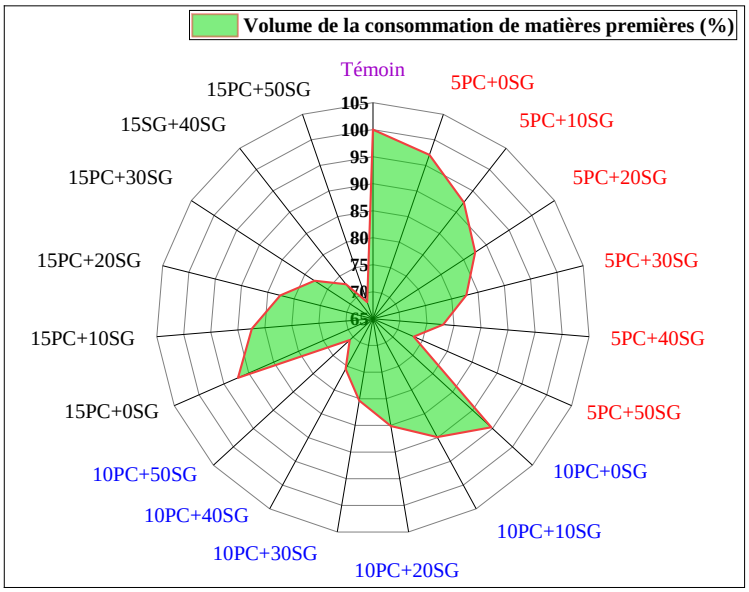


Figure IV.46 *: Impact environnemental par volume de consommation en matières premières pour différents BSF.*

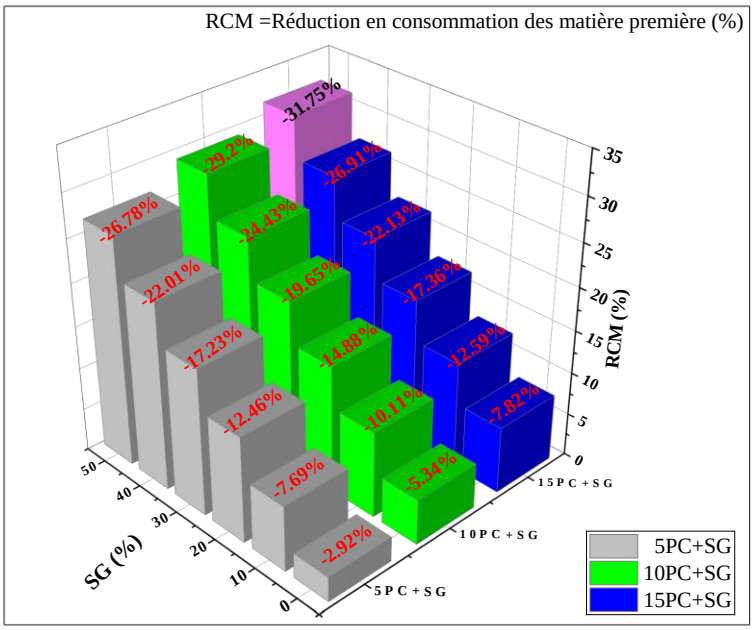


Figure IV.47 *: Coefficient de réduction du volume de consommation en matières premières pour différents BSF.*

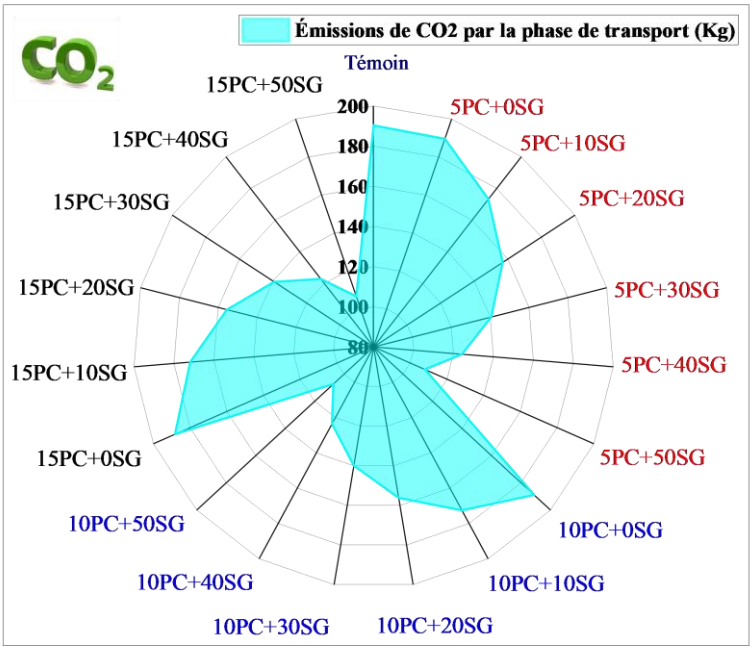


Figure IV.48 *: Émission de CO_2 due à la phase du transport des matières premières pour différents BSF.*

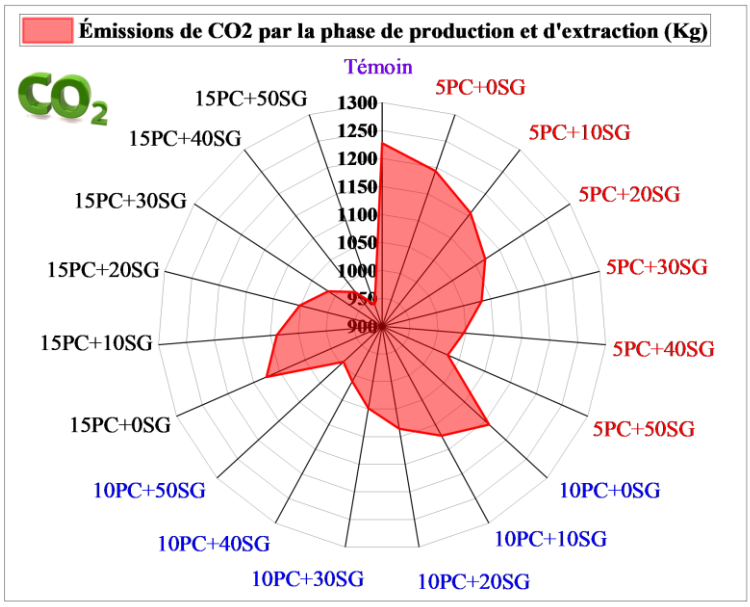


Figure IV.49 *: Émission de CO_2 due à la phase de production et d'extraction des matières premières pour différents BSF.*

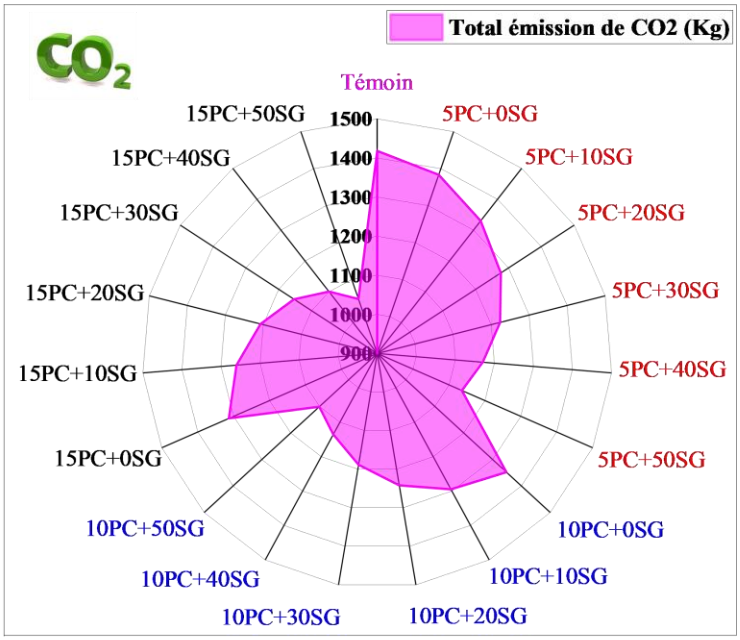


Figure IV.50 *: Émission totale de CO_2 due à la phase de production des différents BSF.*

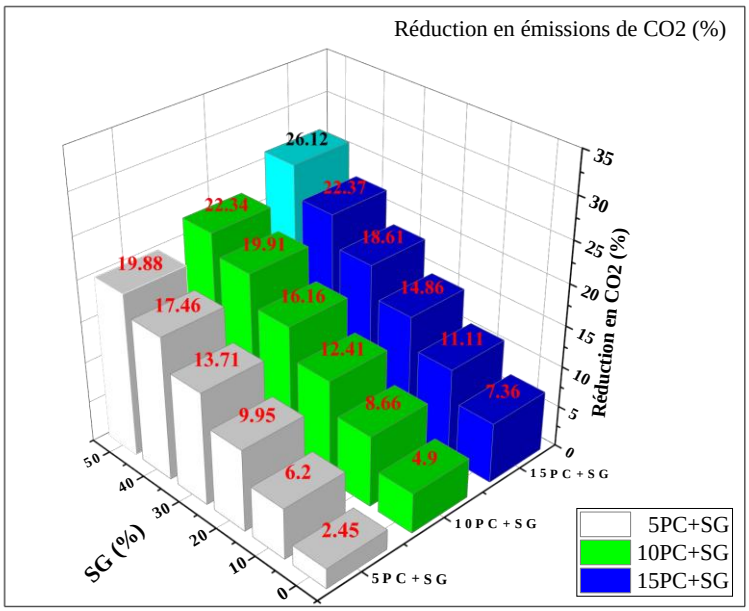


Figure IV.51 *: Coefficient de réduction d'émissions de CO_2 pour différents BSF.*

Le tableau IV.1 illustrent la consommation d'énergie pour 1 m^3 de BSF. Comme indiqué dans le tableau IV.1, la substitution d'une partie du ciment par la PC entraîne une diminution de la consommation d'énergie. Cette diminution varie de -2,68 % à -8,60 % en fonction de l'augmentation de la substitution du ciment par la PC.

Tableau IV.1 *: Impact environnemental des différents mélanges de BSF sur la consommation énergétique pour 1 m^3 de BSF.*

Mélanges	**Consommation en énergie (Gj)**			**Réduction en énergie (%)**
	Ciment	**PC**	**Total énergie (Gj)**	
Témoin	1.86	0	1.86	-
5PC+0SG	1.77	0.041	1.81	-2.68
10PC+0SG	1.67	0.083	1.75	-5.91
15PC+0SG	1.58	0.12	1.7	-8.60

La comparaison des deux compositions avec et sans PC met en évidence que la composition où on a substitué le ciment par la PC réduit le plus les impacts environnementaux, donc elle est bien avantageuse du point de vue environnemental. Par ailleurs, des taux de substitution de la PC 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 la PC montrent un facteur favorable pour l'environnement en termes de consommations d'énergies et d'émissions de polluants atmosphériques. Ces constatations avantageuses indiquent que l'utilisation et la soumission de la PC dans les projets comme ajout cimentaire aux marchés peut être bénéfique pour l'environnement.

Les principaux effets observés suite dans à ce sont synthétisés dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2 *: Principaux effets observés sur BSF aux propretés physico-mécanique, durabilité et impact environnemental.*

Mélanges	Physico-mécanique		Durabilité		Environnement	
	Effet	**Optimum**	Effet	**Optimum**	Effet	**Optimum**
Témoin	-	-	-	-	-	-
5PC+0SG	↑↑		↑↑		↑	
5PC+10SG	↑↑		↑↑		↑	
5PC+20SG	↑↑		↑↑		↑	
5PC+30SG	↑↑		↑↑		↑	
5PC+40SG	↑↑		↑↑			
5PC+50SG	↑↑	••	↑↑	••	↑↑	••
10PC+0SG	↑↑↑		↑↑↑		↑↑	
10PC+10SG	↑↑↑		↑↑↑		↑↑	
10PC+20SG	↑↑↑		↑↑↑		↑↑	
10PC+30SG	↑↑↑		↑↑↑		↑↑	
10PC+40SG	↑↑↑		↑↑↑		↑↑	
10PC+50SG	↑↑↑	••+	↑↑↑	••+	↑↑↑	••
15PC+0SG	↑		↑↑		↑↑↑	
15PC+10SG	↑		↑↑		↑↑↑	
15PC+20SG	↑		↑↑		↑↑↑	
15PC+30SG	↑		↑↑		↑↑↑	
15PC+40SG	↑		↑↑		↑↑↑	
15PC+50SG	↑↑	••	↑↑↑	••	↑↑↑	••+

NOTES :

- Effet positif, ↑ Faible, ↑↑ Moyen, ↑↑↑ Bon.
- Effet négatif, ↓ Faible, ↓↓Moyen, ↓↓↓ Mauvais.
- •• : Optimum choisi.
- ••+ : Plus Optimum choisi.

IV.6. CONCLUSION

Les essais réalisés dans cette partie visent à évaluer l'influence de la poudre de coquillage comme ajout cimentaire et des granulats de granite comme sable sur le comportement physicomécanique et les performances de durabilité, ainsi que l'impact environnemental des BSF.

Les résultats issus de cette étude expérimentale ont permis de conclure que l'ajout de granulats du granite et de la poudre de coquillage améliore les caractéristiques physico-mécaniques à savoir la résistance à la compression et à la flexion, la vitesse d'auscultation sonique, le module d'élasticité , la porosité et l'absorption d'eau. Ceci est dû à la bon adhérence entre la matrice de ciment et le squelette granulaire, ainsi qu'à faible porosité de la zone de transition pâte-granulats due à l'effet de remplissage de la poudre de coquillage et son effet pozzolanique.

En termes de durabilité, la présence de granulats du granite (SG) et de poudre de coquillage (PC) diminue l'effet de la phénomène de RAS, qui influe aussi positivement sur la structure dense de béton. Par contre la diminution de la pénétration des ions chlorure, l'absorption d'eau et la perte de masse et de résistance due à l'exposition à des déférent condition agressives (températures élevées, gelé-dégel, attaque des acides et des sulfates) ont été observées dans les BSF avec l'utilisation combinée du SG avec la PC.

L'effet de l'introduction de la poudre de coquillage est nettement bénéfique et considérable sur les performances physico-mécanique et la durabilité des BSF. Ou obtenue une diminution du volume des éléments expansifs issus de RAS, et augmentant ainsi le taux d'amélioration des résistances mécaniques, ceci attribué à la consommation d'une partie de C-H par la réaction pouzzolanique. L'effet synergique de l'ajout de la poudre de coquillage et des granulats de granite a permis d'améliorer les performances de BSF. La meilleure performance a été observée pour le mélange composé de 10% de PC. En raison de sa forte réactivité pouzzolanique alliée à sa finesse de mouture élevée ($8000 cm^2/g$).

Les résultats de différentes corrélations établies entre les propriétés du BSF 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 GÉNÉRALE

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette présente étude a examiné les effets combinés de la poudre de coquillage (PC) comme ajout cimentaire et du déchet de granite (SG) comme granulat fin sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité des BSF. Par la combinaison synergique de PC et SG, le travail vise à produire un béton de sable fluide 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. Les enseignements les plus importants qu'on peut en tirer sont les suivants :

- L'incorporation combinée des déchets de granite et de la poudre de coquillage a permis d'obtenir des BSF fluides, homogènes et stables qui répondent aux critères de fabrication des BSF ;
- L'augmentation du dosage en SG a réduit la viscosité du BSF, ce qui augmente le risque de ségrégation des BSF. Cependant, l'augmentation du pourcentage de la PC a rattrapé l'effet négatif du SG sur la fluidité, ainsi que minimisé la demande en superplastifiant pour avoir une fluidité acceptable conforme aux exigences recommandées ;
- La résistance à la compression et à la traction, la vitesse ultrasonique et le module d'élasticité sont tous améliorés avec l'augmentation du pourcentage en PC et SG pour tous les âges de durcissement. En effet, les mélanges avec 50 % SG et 10 % PC ont développé les meilleures performances mécaniques ;
- L'augmentation de la quantité de la PC et du SG dans le BSF a diminué considérablement l'absorption d'eau par immersion, la porosité totale et la pénétration des ions chlorures. Les mélanges avec 10 % de PC et 50 % de SG avaient les plus faibles valeurs de ces propriétés avec une diminution de l'ordre de 33,04 %, 45.06% et 49.70 % dans l'absorption d'eau, la porosité et la pénétration des ions chlorures, respectivement, par rapport au BSF témoin ;

- L'utilisation de PC combinée avec le SG dans les mélanges de BSF pourrait réduire l'expansion de la réaction alcali-silice. Les mélanges avec 5%, 10% et 15 % de PC et 50% de SG avaient des valeurs les plus faibles de RAS par rapport au mélange de référence, et sont tous inférieurs à la limite règlementaire de 0,1 % ;
- Quel que soit le niveau de remplacement du ciment par la PC, l'ajout de jusqu'à 50% de SG a amélioré la résistance des BSF aux hautes températures, aux cycles gel/dégel et aux attaques chimiques (acides et sulfates) par rapport au BSF témoin;
- L'analyse par MEB a indiqué que l'utilisation de PC dans les mélanges de BSF avec jusqu'à 50% du SG a entraîné une amélioration de la compacité et de la zone de transition (pate/granulats) en remplissant les vides suite à la formation des nouveaux hydrates par son effet pozzolanique, surtout à long terme ;
- En termes d'impact environnemental, l'utilisation de PC dans les BSF à base de SG pourrait réduire la quantité d'immersion de CO_2, la consommation des ressources naturelles et les besoins énergétiques.

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 (poudre de perlite, poudre de zéolite …..) pour avoir un effet combiné avec les granulats de granite dans les mélanges des bétons ;

- L'effet de la poudre de coquillage comme ajout cimentaire avec d'autres granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et durabilité des bétons ;
- L'effet de la finesse de la poudre de coquillage (à l'échelle nanoparticules) comme ajout cimentaire sur les propriétés rhéologiques et durabilité des bétons ;
- Étude d'autres propriétés de durabilité telles que la carbonatation;
- L'effet de la poudre de coquillage et la poudre de granite comme ajout cimentaire ternaire sur les propriétés des bétons de sable fluide ;
- Prévoir une modélisation des résultats trouvés permettant les prévisions des caractéristiques des bétons.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]Guendouz, M. and D. Boukhelkhal, Properties of flowable sand concrete containing ceramic wastes. Journal of Adhesion Science and Technology, 2019. **33**(24): p. 2661-2683.https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1653594

[2]Bédérina, M., et al., Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. Cement and concrete research, 2005. **35**(6): p. 1172-1179.

[3]Hadjoudja, M., et al., Statistical models to optimize fiber-reinforced dune sand concrete. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014. **39**: p. 2721-2731.

[4]Gadri, K., Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable, 2018, Université Mohamed Khider-Biskra.

[5]Bouziani, T., M. Bederina, and M. Hadjoudja, Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC). International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012. **6**(1): p. 59-64.

[6]Sablocrete, S., Concrete: Characteristics and Use Practices. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées LCPC, 1994.

[7]Cappelli, P. and K. Chauvin, An interplant test of the efficiency wage hypothesis. The Quarterly Journal of Economics, 1991. **106**(3): p. 769-787.

[8]Abdeljalil, K., et al., Thrombophlébite de la veine ovarienne: une urgence à ne pas méconnaître. Imagerie de la Femme, 2010. **20**(3): p. 165-168.

[9]Belferrag, A., A. Kriker, and E. Khenfer, Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les matériaux de constructions en zones sahariennes. 2007.

[10]Tolba, T., A. Moroncini, and Y. Kehila, Le recouvrement des coûts: un défi pour une gestion durable des déchets ménagers en Algérie: cas de la Commune d'Annaba, in Le recouvrement des coûts: un défi pour une gestion durable des déchets ménagers en Algérie: cas de la Commune d'Annaba: Tolba, Tahar Moroncini, Aurore uKehila, Youcef2020, Liège (Belgium): CIRIEC International, Université de Liège.

[11]Guendouz, M., Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écot-matériau de construction à base de déchets plastiques, 2017, Université Yahia Farès de Médéa.

[12]Busemeyer, J.R. and A. Diederich, Cognitive modeling2010: Sage.

[13]Bavelier, D., et al., Visual attention to the periphery is enhanced in congenitally deaf individuals. The Journal of Neuroscience, 2000. **20**(17): p. RC93.

[14]Zhao, B., et al., Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2008. **113**(A11).

[15]Shink, M., Fissuration des materiaux cimentaires renforces de microfibres d'acier2001: Universite Laval.

[16]Melais, S., D. Achoura, and R. Jauberthie. Comportement mécanique des plaques en béton de sable renforcé de fibres métalliques. in Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. 2011. Editions ESKA.

[17]Ramachandran, V.S., et al., Superplasticizers: properties and applications in concrete. 1998.

[18]Law Yim Wan, D.S., F. Aslani, and G. Ma, Lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. **30**(8): p. 04018178.

[19]Boukhelkhal, Dj., et al., Combined effect of mineral admixture and curing temperature on mechanical behavior and porosity of SCC. Advances in Concrete Construction, 2018, **6(1)**: p. 69-85.https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.1.069

[20] PILOT, Georges. 250 ans de Patrimoine du génie civil en France. 2010.

[21] CONCRETE, Self-Compacting. The European guidelines for self-compacting concrete. *BIBM, et al*, 2005, vol. 22, p. 563.

[22]Belfriekh, A., N. Talla, and S.E. Benmessaoud, Etude des bétons de sable, 2019, Université de Jijel.

[23]Benaissa, A., et al. Cinétique de déssication et retrait du béton de sable. in Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics. 1992.

[24]Bederina, M., Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux: effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau. Mémoire de Magister, Université Amar Thélidji, Laghouat, 2000.

[25]Belhadj, B., et al., Effect of the type of sand on the fracture and mechanical properties of sand concrete. Advances in concrete construction, 2014. **2**(1): p. 013.

[26]SABLOCRETE, P., Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Béton de sable, Caractéristiques et pratique d'utilisation. Ed. Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.

[27]Khay, S.E.E., A.J. Slaoui, and J. Nejif. PROPOSITION D'UN NOUVEAU BÉTON POUR LES STRUCTURES DE BÂTIMENT/PROPOSAL OF A NEW CONCRETE BUILDING STRUCTURES. in Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. 2014. Editions ESKA.

[28]Benaissa, I., et al., Properties of fibred sand concrete sprayed by wet-mix process. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015. **40**: p. 2289-2299.

[29] BEN HADJ TAHAR, D.; TRIKI, Z., GUENDOUZ, M.; TAHRAOUI, H.; ZAMOUCHE, M.; KEBIR, M.; ZHANG, J.; AMRANE, A. Characterization and Thermal Evaluation of a Novel Bio-Based Natural Insulation Material from Posidonia oceanica Waste: A Sustainable Solution for Building Insulation in Algeria. ChemEngineering, v. 8, n. 1, p. 18, 2024.

[30]Salima, R., Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux, 2012.

[31]Abidelah, A., et al., Characterization of a self-compacting sand concrete using the quarry waste. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009. **36**(11): p. 1773-1782.

[32]Tayeb, B., et al., Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete. The Open Construction & Building Technology Journal, 2011. **5**(1).

[33]Ouchi, M., et al., Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States. Kochi University of Technology, Kochi, Japan, 2003.

[34]Guendouz, M., D. Boukhelkhal, and A. Bourdot. Recycling of floor tile waste as fine aggregate in flowable sand concrete. in Advances in Green Energies and Materials Technology: Selected Articles from the Algerian Symposium on Renewable Energy and Materials (ASREM-2020). 2021. Springer.https://doi.org/10.1007/978-981-16-0378-5_30

[35]Tayeb, B., et al., Properties of flowable sand-concretes reinforced by polypropylene fibers.

[36]Prud'Homme, E., Valorisation de matières premières alternatives dans les matériaux pour la construction durable, 2022, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon; Université Lyon 1-Claude .

[37]Pons, F., La tornade du 23/1022 en France: Analyse météo et lien avec le Réchauffement Climatique.

[38]Bergès, J.C. and H. Cochet, Les rapports du GIEC et leur mise en politique: entre science et stratégie. Développement, changements globaux et dynamique des territoires. Théories, approches et perspectives de recherche, 2022: p. 267-286.

[39]Friedlingstein, P., et al., Global carbon budget 2022. Earth System Science Data Discussions, 2022. **2022**: p. 1-159.

[40]Oberle, B., et al., Global resources outlook: 20192019: International Resource Panel, United Nations Envio, Paris, France.

[41]UNIVERSALIS, Encyclopaedia, AUBRY, Alain, et BERSANI, Jacques. *Encyclopaedia universalis*. Encyclopaedia universalis, 1992.

[42]Peduzzi, P., Sand, rarer than one thinks. Environmental Development, 2014. **11**(208-218): p. 682.

[43]UICN, P., WWF, Stratégie mondiale de la conservation. La conservation des ressources vivantes au service du développement durable. Gland, UICN, 1980.

[44]Environment, W.C.o., Development, and G.H. Brundtland, Opening Address by Gro Harlem Brundtland... on the Occasion of the Launch of the Report" Our Common Future", London, England, 27 April 19871987: World Commission on Environment and Development.

[45]Hodgkinson, J.H. and M.H. Smith, Climate change and sustainability as drivers for the next mining and metals boom: The need for climate-smart mining and recycling. Resources Policy, 2021. **74**: p. 101205.

[46]Liudmila, C. and Y. Balkiz, Bridging sustainable construction technologies and heritage: novel approach to the conservation of the built environment, in Sustainable Construction Technologies2019, Elsevier. p. 395-442.

[47]Yung, E.H. and E.H. Chan, Implementation challenges to the adaptive reuse of heritage buildings: Towards the goals of sustainable, low carbon cities. Habitat international, 2012. **36**(3): p. 352-361.

[48]Tam, V.W. and C.M. Tam, A review on the viable technology for construction waste recycling. Resources, conservation and recycling, 2006. **47**(3): p. 209-221.

[49]Pour le Climat, H.C., Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation. Rapport annuel, 2021.

[50]Rapport sur l'Etat de l'Environnement en France (REE), F.t., L'extraction de matières minérales en France, Service Statistique du Ministère en charge de l'Environnement, Mise à jour le 6 février 2021.

[51]Hill, R.C. and P.A. Bowen, Sustainable construction: principles and a framework for attainment. Construction Management & Economics, 1997. **15**(3): p. 223-239.

[52]Leonardon, P., Perspectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la rénovation énergétique BBC. Rapport de l'ADEME, 2019.

[53] CHANGE, IPCC Climate, *et al.* Mitigation of climate change. *Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2014, vol. 1454, p. 147.

[54]EN, N., 197–1-Ciment—Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. AFNOR, Paris, 2001.

[55]Onn, C.C., et al., Strength, carbon footprint and cost considerations of mortar blends with high volume ground granulated blast furnace slag. Sustainability, 2019. **11**(24): p. 7194.

[56]Zareei, S.A., et al., Performance of sustainable high strength concrete with basic oxygen steel-making (BOS) slag and nano-silica. Journal of Building Engineering, 2019. **25**: p. 100791.

[57]Teh, S.H., et al., Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia. Journal of cleaner production, 2017. **152**: p. 312-320.

[58]Bazzaro, F. and Y. Meyer, Méthodologie de prise en compte des impacts environnementaux et sociaux dans la définition de problématiques de recherche: application aux structures composites instrumentées. Technologie et innovation, 2020. **5**(1): p. 14.

[59]De Filippis, U., E. Prud'Homme, and S. Meille, Sodium hydroxide substitution in slag activating mixes: A potential pathway to more sustainable slag-based binders. Construction and Building Materials, 2021. **300**: p. 124183.

[60]Pimienta, P. and S. Remond, Bétons de déchets: prévenir les risques". CSTB magazine, 1997(109).

[61]Harini, B. and K. Ramana, Use of recycled plastic waste as partial replacement for fine aggregate in concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2015. **4**(9): p. 8596-8603.

[62]Maystre, L.Y., J. Pictet, and J. Simos, Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. Vol. 8. 1994: PPUR presses polytechniques.

[63]RANIA, A., B. AMINA, and L. YASSAMINE, la valorisation des déchets organiques. 2020.

[64]Gillet, G., S. Ammor, and G. Fillion, Serotonin inhibits acetylcholine release from rat striatum slices: evidence for a presynaptic receptor-mediated effect. Journal of neurochemistry, 1985. **45**(6): p. 1687-1691.

[65]Ademe, A., A. Ayalew, and K. Woldetsadik, Evaluation of antifungal activity of plant extracts against papaya anthracnose (Colletotrichum gloeosporioides). Journal of Plant Pathology and Microbiology, 2013. **4**(10): p. 1-4.

[66]Henry, M., Pollution du milieu marin par les déchets solides: Etat des connaissances. Perspectives d'implication de l'Ifremer en réponse au défi de la Directive Cadre Stratégie Marine et du Grenelle de la Mer. 2010.

[67]Janković, B., et al., Thermo-oxidative evolution and physico-chemical characterization of seashell waste for application in commercial sectors. Thermochimica acta, 2020. **686**: p. 178568.

[68]Meddah, M.S. Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact. in MATEC Web of Conferences. 2017. EDP Sciences.

[69]Daneti, S.B. and C.T. Tam. Sustainability of Concrete Constructions: The Role of Materials and Practices. in Emerging Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICETCE 2018. 2020. Springer.

[70]Boudali, S., et al., Investigating potential implementation of different agro-wastes in concrete. 2019.

[71]Yang, Y.-F. and G.-L. Ma, Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams. Thin-Walled Structures, 2013. **66**: p. 62-75.

[72]Letelier, V., E. Tarela, and G. Moriconi, Mechanical properties of concretes with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement. Procedia Engineering, 2017. **171**: p. 627-632.

[73]Thormark, C., The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. Building and environment, 2006. **41**(8): p. 1019-1026.

[74]CEMBUREAU, T., World Statistical Review 1996-2008 Cement Production. Trade, Consumption Data, 2010.

[75]Szabó, L., et al., Energy consumption and CO2 emissions from the world cement industry. European Commission Joint Research Centre, Report EUR, 2003. **20769**.

[76]Palomo, A., et al., Hybrid binders: A journey from the past to a sustainable future (opus caementicium futurum). Cement and Concrete Research, 2019. **124**: p. 105829.

[77]Scrivener, K.L., V.M. John, and E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and concrete Research, 2018. **114**: p. 2-26.

[78]Adesina, A. and P. Awoyera. Utilization of biomass energy in cement production: a pathway towards sustainable infrastructure. in Renewable Energy and Sustainable Buildings: Selected Papers from the World Renewable Energy Congress WREC 2018. 2020. Springer.

[79]Footprint, F.W., Food wastage footprint: impacts on natural resources: summary report. Food & Agriculture Org: Québec City, QC, Canada, 2013.

[80]Andrew, R.M., Global CO 2 emissions from cement production. Earth System Science Data, 2018. **10**(1): p. 195-217.

[81]Moumin, G., et al., CO2 emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. Renewable energy, 2020. **145**: p. 1578-1596.

[82]Punthama, C., N. Supakata, and V. Kanokkantapong, Characteristics of concrete bricks after partially substituting Portland cement Type 1 with cement and seashell waste and partially substituting sand with glass waste. EnvironmentAsia, 2019. **12**(1).

[83]Mo, K.H., et al., Recycling of seashell waste in concrete: A review. Construction and Building Materials, 2018. **162**: p. 751-764.

[84]Perea, A., T. Kelly, and Y. Hangun-Balkir, Utilization of waste seashells and Camelina sativa oil for biodiesel synthesis. Green Chemistry Letters and Reviews, 2016. **9**(1): p. 27-32.

[85]Abdelouahed, A., et al., Effect of cockele shells on mortars performance in extreme conditions. Civil and Environmental Engineering Reports, 2019. **29**(2): p. 60-73.

[86]Varhen, C., S. Carrillo, and G. Ruiz, Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. Construction and Building Materials, 2017. **136**: p. 533-540.

[87]Martínez-García, C., et al., Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. Construction and building materials, 2017. **139**: p. 570-583.

[88]Nguyen, D.H., et al., Durability of pervious concrete using crushed seashells. Construction and Building Materials, 2017. **135**: p. 137-150.

[89]Othman, N.H., et al., Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2013. **25**(2): p. 201-211.

[90]Olivia, M., A.A. Mifshella, and L. Darmayanti, Mechanical properties of seashell concrete. Procedia Engineering, 2015. **125**: p. 760-764.

[91]Olivia, M. and R. Oktaviani, Properties of concrete containing ground waste cockle and clam seashells. Procedia engineering, 2017. **171**: p. 658-663.

[92]Otunyo, A.W., I.U. Friday, and T.A. Israel, Exploratory study of crushed periwinkle shell as partial replacement for fine aggregates in concrete. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, 2013. **4**(6): p. 823-827.

[93]Zaid, S.T. and V.G. Ghorpade, Experimental investigation of snail shell ash (SSA) as partial repalacement of ordinary portland cement in concrete. Int. J. Eng. Res. Technol, 2014. **3**(10): p. 1049-1054.

[85]Abowei, J. and E. Ezekiel, Potential and uses of fish products and other aquatic animals. Scientia Agriculturae, 2013. **3**(3): p. 70-81.

[86]Mmom, P.C. and S.B. Arokoyu, Mangrove forest depletion, biodiversity loss and traditional resources management practices in the Niger Delta, Nigeria. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2010. **2**(1): p. 28-34.

[87]Eziefula, U.G., J.C. Ezeh, and B.I. Eziefula, Properties of seashell aggregate concrete: A review. Construction and Building Materials, 2018. **192**: p. 287-300.

[88]G. Sposito, T.C.o.S., 3rd ed. Oxford University Press, New York, (2016) 225.

[89]Robert, M. and S. Kharagani, Valorisation des sables de dragage des îles-de-la-Madeleine et des carapaces de crustacés dans une matrice cimentaire.

[93]Connolly, R.M., N.K. Nguyen, and S. Sukumar, Molecular pathways: current role and future directions of the retinoic acid pathway in cancer prevention and treatment. Clinical Cancer Research, 2013. **19**(7): p. 1651-1659.

[99]Dankwah, J.R. and E. Nkrumah, Recycling blends of rice husk ash and snail shells as partial replacement for Portland cement in building block production. Ghana Journal of Technology, 2016. **1**(1): p. 67-74.

[101]Lertwattanaruk, P., N. Makul, and C. Siripattarapravat, Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. Journal of environmental management, 2012. **111**: p. 133-141.

[102]Zhong, X., et al., QTL mapping for glycogen content and shell pigmentation in the Pacific oyster Crassostrea gigas using microsatellites and SNPs. Aquaculture international, 2014. **22**: p. 1877-1889.

[103]Tayeh, B.A., et al., Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement. Journal of Building Engineering, 2020. **31**: p. 101328.

[104]FAO, F., Agriculture Organization of the United Nations, The State of World. Fisheries and Aquaculture. FAO: Rome, 2016.

[105]Muthusamy, K., et al., Setting Time and Compressive Strength of Mortar Containing Cockle Shell Powder as Partial Cement Replacement. Key Engineering Materials, 2021. **879**: p. 62-67.

[106]Hasnaoui, A., et al., Valorization of queen scallop shells in the preparation of metakaolin-based geopolymer mortars. Journal of Building Engineering, 2022. **53**: p. 104578.

[107]Nordin, N., et al., Effect of temperature in calcination process of seashells. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2015. **19**(1): p. 65-70.

[108]Martínez-García, C., et al., Impact of mussel shell aggregates on air lime mortars. Pore structure and carbonation. Journal of cleaner production, 2019. **215**: p. 650-668.

[109]Tayeh, B.A., et al., Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review. Journal of Cleaner Production, 2019. **237**: p. 117723.

[110]Maglad, A.M., et al., Assessing the mechanical, durability, thermal and microstructural properties of sea shell ash based lightweight foamed concrete. Construction and Building Materials, 2023. **402**: p. 133018.

[111]Ubachukwu, O.A. and F.O. Okafor, Investigation of the supplementary cementitious potentials of oyster shell powder for eco-friendly and low-cost concrete. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2019. **24**(5): p. 1297-1306.

[112]Hazurina, N., et al., Potential use of cockle (Anadara granosa) shell ash as partial cement replacement in concrete. Caspian Journal of Applied Sciences Research, 2013. **2**: p. 369-376.

[113]Rashad, A.M., Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition–A comprehensive overview. Construction and building materials, 2013. **41**: p. 303-318.

[114] Hadjadj, M.; Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj. The effect of using seashells as cementitious bio-material and granite industrial waste as fine aggregate on mechanical and durability properties of green flowable sand concrete. Journal of Building Engineering, v. 87, p. 108968, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108968

[115]Sandjaya, A. and D. Christianto. Experimental Study of Mortar Compressive Strength with Anadara Granosa Powder as a Substitute for Partial Use of Cement. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. IOP Publishing.

[116]Adewuyi, A.P., S.O. Franklin, and K.A. Ibrahim, Utilization of mollusc shells for concrete production for sustainable environment. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2015. **6**(9): p. 201-208.

[117]Bamigboye, G.O., et al., Sustainable use of seashells as binder in concrete production: Prospect and challenges. Journal of Building Engineering, 2021. **34**: p. 101864.

[118]Ez-Zaki, H., et al., Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder. Materiales de construcción, 2016. **66**(321): p. e080-e080.

[119]Li, G., et al., Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash. Journal of Cleaner Production, 2015. **91**: p. 279-287.

[120]Cuadrado-Rica, H., et al., Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells. Materials and structures, 2016. **49**: p. 1805-1816.

[121]Djamel, B., Valorisation des matériaux granulaires issus des gissements de roches massives de la wilaya de Bejaia cas de somacob akbou, 2008, Bejaia, Université Abderrahmane Mira. Faculté de la Technologie.

[122]Azzeddine, M., L'acceptabilité sociale des projets miniers en Algérie: Cas de Ain Defla et Bejaia. European Scientific Journal, 2015. **11**(3).

[123] C.R. Rollakanti, et al., An experimental investigation on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with wood ash and fine sea shell powder, Mater. Tod. Proceedings 43 (2021) 1325–1330.

[124]Koutchoukali, N., S. Adjali, and Y. Benachour. Reconnaissance des sables de concassage de la région de Constantine. in Proceedings of the National Seminar organised by Fiercest and CTC Est (in French), Béjaia, Algeria. 1992.

[125]Degouet, C., Caractérisation de matériaux granulaires et de leurs écoulements dans les silos verticaux. Mise en oeuvre d'une méthode d'investigation expérimentale et numérique, 2005, Université de Bretagne occidentale-Brest.

[126]Abbas, A., et al., Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. Materials characterization, 2009. **60**(7): p. 716-728.

[127]Fritzen, F., T. Böhlke, and E. Schnack, Periodic three-dimensional mesh generation for crystalline aggregates based on Voronoi tessellations. Computational Mechanics, 2009. **43**: p. 701-713.

[128]Meziane, E.H., Etude des propriétés mécaniques et durabilite du béton a base de sable concassage. 2016.

[129]DE, A.L., et al., L'OPPIDUM DE BIBRACTE (MONT BEUVRAY, FRANCE) BILAN DE 10 ANNEES DE RECHERCHES (1996-2005). 2008.

[130] PRUD'HOMME, Elodie. *Valorisation de matières premières alternatives dans les matériaux pour la construction durable*. 2022. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon; Université Lyon 1-Claude Bernard.

[131]Brown, R.L. and J.C. Richards, Principles of powder mechanics: essays on the packing and flow of powders and bulk solids. Vol. 10. 2016: Elsevier.

[132]Jemmali, N., Influence de la forme et de la rugosite des particules d'un granulat sur les proprietes et les couts du beton compacte au rouleau1998: Universite de Sherbrooke.

[133]Abdelkader, N., CONCEPTION DES FONDATIONS SUR COLONNES BALLASTÈES CAS D'OUVRAGES D'ARTS. Magister thesis (2012), Université de Batna 2. 2017.

[134]DUPAIN.R , L.R.e.S.-A.J.G., SOL, CIMENT, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » Edition CASTEILLA Paris 1999.

[135]Des, M., M. Et, and D. Carrieres, Plan de présentation. Proceedings of the 40ème Anniv. du Bur. des Mines la Géologie du Burkina, Ouagadougou, Burkina Faso, 2018. **6**.

[136]Chen, J., et al., Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar. Powder Technology, 2020. **364**: p. 404-415.

[137]Medina, G., et al., Durability of new recycled granite quarry dust-bearing cements. Construction and Building Materials, 2018. **187**: p. 414-425.

[138]Jain, K.L., G. Sancheti, and L.K. Gupta, Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. Construction and Building Materials, 2020. **252**: p. 119075.

[139]Gupta, L.K. and A.K. Vyas, Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. Construction and Building Materials, 2018. **191**: p. 155-164.

[140]Li, L., et al.Filler technology of adding granite dust to reduce cement content and increase strength of mortar. Powder Technology, 2019. **342**: p. 388-396.

[141]Boutemedjet, A., et al.Caractérisation des matériaux de construction et impact de la préparation mécanique sur l'environnement: Cas du gisement de granite de Kef Bouacida-Annaba, Algérie. 2019.

[142]Arel, H.Ş. and F.U. Shaikh, Semi-green cementitious materials from waste granite by considering the environmental, economic, and health impacts: A review. Structural Concrete, 2019. **20**(1): p. 455-470.

[143]Jeyaprabha, B., G. Elangovan, and P. Prakash, Effects of elevated temperature and water quenching on strength and microstructure of mortars with river sand substitutes. Construction and building materials, 2016. **114**: p. 688-698.

[144]Ghannam, S., H. Najm, and R. Vasconez, Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. Sustainable Materials and Technologies, 2016. **9**: p. 1-9.

[145]Abukersh, S. and C. Fairfield, Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. Construction and Building Materials, 2011. **25**(10): p. 4088-4094.

[146]Allam, M., E. Bakhoum, and G. Garas, Re-use of granite sludge in producing green concrete. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2014. **9**(12): p. 2731-2737.

[147]Bacarji, E., et al., Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. Construction and Building materials, 2013. **45**: p. 1-10.

[148]Ramos, T., et al., Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. Construction and Building Materials, 2013. **47**: p. 1001-1009.

[149]Makani, A., et al. Time-dependent behaviour of high performance concrete: influence of coarse aggregate characteristics. in EPJ Web of conferences. 2010. EDP Sciences.

[150]Li, H., et al., Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete. Construction and Building Materials, 2016. **109**: p. 41-46.

[151]Kumar, Y.Y., C.V. Vardhan, and A. Anitha, Use of granite waste as partial substitute to cement in concrete. Int. J. Environ. Res, 2015. **5**: p. 25-31.

[152] Guendouz, M.; Debieb, F.; Kadri, E. H. Formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May Bayonne, France, 2015.. ⟨hal-01167754⟩

[153]Wang, D., et al., Recent Advances in the Reutilization of Granite Waste in Various Fields. Journal of Material Science and Technology Research, 2021. **8**: p. 30-40.

[154]Faella, C., et al., Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study. Cement and Concrete Composites, 2016. **71**: p. 85-96.

[155]Singh, S., et al., Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. Journal of Cleaner Production, 2016. **116**: p. 223-235.

[156]Singh, S., et al., Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. Journal of Cleaner Production, 2016. **119**: p. 86-98.

[157]Vijayalakshmi, M. and A. Sekar, Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. Construction and Building Materials, 2013. **46**: p. 1-7.

[158]Sadek, D.M., M.M. El-Attar, and H.A. Ali, Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. Journal of Cleaner Production, 2016. **121**: p. 19-32.

[159]Prokopski, G., V. Marchuk, and A. Huts, The effect of using granite dust as a component of concrete mixture. Case Studies in Construction Materials, 2020. **13**: p. e00349.

[160]Oorkalan, A., et al., Experimental study on high volume fly ash concrete made with coir pith and quarry dust. Materials Today: Proceedings, 2020. **21**: p. 833-836.

[161]Li, Z., et al., A review on substitution of natural sand with granite fines in sustainable concrete. Construction and Building Materials, 2022. **346**: p. 128417.

[162]Singh, S., R. Nagar, and V. Agrawal, Feasibility as a potential substitute for natural sand: a comparative study between granite cutting waste and marble slurry. Procedia Environmental Sciences, 2016. **35**: p. 571-582.

[163] Raghavendra, R., S. Sharada, and M. Ravindra, Compressive strength of high performance concrete using granite powder as fine aggregate. Int. J. Res. Eng. Technol, 2015. **4**: p. 47-49.

[164]Adigun, E.M.A. and B. Eng, Cost effectiveness of replacing sand with crushed granite fine (CGF) in the mixed design of concrete. IOSR J. Mech. Civ. Eng.(IOSR JMCE), 2013. **10**(1): p. P01-P06.

[165]Singh, S., et al. Utilization of granite cutting waste in concrete as partial replacement of sand. in Conference paper: UKIERI Concrete Congress–Concrete Research Driving Profit and Sustainability, Jalandhar, India. 2015.

[166]Hunger, M. and J. Brouwers, Natural Stone Waste Powders Applied to SCC Mix Design/Mehlkornfeine Abfallstoffe der Natursteinindustrie in der Projektierung von SVB. Restoration of Buildings and Monuments, 2008. **14**(2): p. 131-140.

[167]Cordeiro, G.C., L.M.S.C. de Alvarenga, and C.A.A. Rocha, Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. Construction and Building Materials, 2016. **111**: p. 766-773.

[168] Blaifi, H.;Guendouz, M.; Belhadj, A. E.; Boukhelkhal, Dj.; Hadjadj, M. Sustainable use of recycled plastic and ceramic industrial wastes in eco-friendly construction materials. Environmental Engineering and Management Journal, v. 22, n. 8, p. 1479-1494, 2023. http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/; http://www.eemj.eu

[169]Singh, S., R. Nagar, and V. Agrawal, A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. Journal of cleaner production, 2016. **126**: p. 74-87.

[170]Nuaklong, P., et al., Pre-and post-fire mechanical performances of high calcium fly ash geopolymer concrete containing granite waste. Journal of Building Engineering, 2021. **44**: p. 103265.

[171]Zafar, M.S., et al., Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete. Construction and Building Materials, 2020. **250**: p. 118878.

[172]Binici, H. and O. Aksogan, Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. Journal of Building Engineering, 2018. **19**: p. 109-121.

[173]Nascimento, A.S., et al., Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes. Journal of Cleaner Production, 2020. **265**: p. 121808.

[174]Chiranjeevi Reddy, K., Y. Yaswanth Kumar, and P. Poornima, Experimental study on concrete with waste granite powder as an admixture. Int. J. Eng. Res. Appl, 2015. **5**: p. 87-93.

[175]Elhag, A.B., et al., A critical review on mechanical, durability, and microstructural properties of industrial by-product-based geopolymer composites. Reviews on Advanced Materials Science, 2023. **62**(1): p. 20220306.

[176]Barros Martins, M.A., et al., Study on waste foundry exhaust sand, WFES, as a partial substitute of fine aggregates in conventional concrete. Sustainable cities and society, 2019. **45**: p. 187-196.

[177]Dhanapandian, S., B. Gnanavel, and T. Ramkumar, Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2009. **4**(2): p. 147-160.

[178]Jain, A., R. Gupta, and S. Chaudhary, Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. Construction and Building Materials, 2019. **221**: p. 539-552.

[179]James, A., et al., Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review. Construction and Building Materials, 2019. **224**: p. 1026-1039.

[180]Donza, H., O. Cabrera, and E. Irassar, High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete research, 2002. **32**(11): p. 1755-1761.

[181]Felixkala, T. and P. Partheeban, Granite powder concrete. Indian Journal of science and Technology, 2010: p. 311-317.

[182]Williams, K., P. Partheeban, and F. Kala, Mechanical properties of high performance concrete incorporating granite powder as fine aggregate. International Journal on Design and Manufacturing Technologies, 2008. **2**(1): p. 67-73.

[183]Felixkala, T. and V. Sethuraman, Shrinkage properties of HPC using granite powder as fine aggregate. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2013. **2**(3): p. 637-643.

[184]Falade, F., Effects Of Separation Of Grain Sizes Of Fine Aggregate On Properties Of Concrete Containing Granite Fines. 1999.

[185]Singh, M. and R. Siddique, Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate. Journal of Cleaner Production, 2015. **91**: p. 269-278.

[186]Scholz, T.V. and S. Keshari, Abrasion-resistant concrete mix designs for precast bridge deck panels, 2010, Kiewit Center for Infrastructure and Transportation.

[187]Singh, S., et al., Experimental investigation of sustainable concrete made with granite industry by-product. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017. **29**(6): p. 04017017.

[188]Castro, J., D. Bentz, and J. Weiss, Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete. Cement and Concrete Composites, 2011. **33**(8): p. 805-813.

[189]Henkensiefken, R., et al., Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate. Cement and Concrete Research, 2009. **39**(10): p. 883-892.

[190]Ostrowski, K., et al., Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 2020. **238**: p. 117794.

[191]Oyekan, G. and O. Kamiyo, Effect of Nigerian rice husk ash on some engineering properties of sandcrete blocks and concrete. Research Journal of applied sciences, 2008. **3**(5): p. 345-351.

[192]Bhandari, J.J., Munnur, S., 2015. Strength and Durability Aspects of Partial Replacement of Sand by Granite Fines (4), 194e200.

[193]Pacheco-Torgal, F., Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. Construction and building materials, 2014. **51**: p. 151-162.

[194] Jain, A., et al., Abrasion resistance and sorptivity characteristics of SCC containing granite waste. Materials Today: Proceedings, 2020. **27**: p. 524-528.

[195]Pacheco-Torgal, F. and J. Labrincha, Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability. Construction and Building Materials, 2013. **40**: p. 1136-1141.

[196]Febin, G.K., et al., Strength and durability properties of quarry dust powder incorporated concrete blocks. Construction and Building Materials, 2019. **228**: p. 116793.

[197]EN, B., 197-1: 2000, Cement: Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements", British Standards Institute, 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL, 2000.

[198]Mebrouki, A., N. Belas, and N. Bouhamou, FORMULATION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT PAR LA MÉTHODE DE LA PÂTE EN ÉCXÈS.

[199] OKAMURA, Hajime et OUCHI, Masahiro. Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 2003, vol. 1, no 1, p. 5-15.

[200] Benimam, S.; Debieb, F.; Bentchikou, M.; Guendouz, M.Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton. MATEC web of conferences, v. 11, p. 01033, 2014. https://doi.org/10.1051/matecconf/20141101033

[201] Benimam, S.; Bentchikou, M.; Debieb, F.; Kenai, S.; Guendouz, M. Physical and mechanical properties of cement mortar with LLDPE powder and PET fiber wastes. Advances in concrete construction, v. 12, n. 6, p. 461-467, 2021. https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.6.461

[202] EFNARC, Specification. Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk, UK. *English ed., February*, 2002.

[203] EN, B. S. 12350-8,"Testing fresh concrete—Part 8: Self-compacting concrete-Slump-flow test". *European Committee for Standardization (CEN) Annual Report, Brussels*, 2010.

[204] CSN, E. N. 12350-9 Testing fresh concrete–Part 9: Self-compacting concrete–V-funnel test. *British Standards publication*, 2010.

[205] EN, T. 196-1 (equivalence EN 196-1): Methods of Testing Cement—Part 1: Determination of Strength. *Turkish Standards Institution, Ankara, TURKEY*, 2002, vol. 24.

[206] ASTM. ASTM C 597: Standard test method for pulse velocity through concrete. *Annual book of ASTM standards*, 2016, vol. 4, p. 3-6.

[207] STANDARD, A. S. T. M. C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2014, p. 1-5.

[208]Kumar, G. and U.K. Sharma, Standard test methods for determination of abrasion resistance of concrete. International Journal of Civil Engineering Research, 2014. **5**(2): p. 155-162.

[209]Nguyen, D.-T., D.-L. Nguyen, and M.N.-T. Lam, An experimental investigation on the utilization of crushed sand in improving workability and mechanical resistance of concrete. Construction and Building Materials, 2022. **326**: p. 126766.

[210]GUENDOUZ, M. and F. Debieb, Contribution à la formation et à la Caractérisation d'un éco-materiau de construction à base de déchets Plastiques application au béton de Sable, 2017.

[211]NF EN 993–15, Test methods for dense shaped refractories—Part 15: Determination of thermal conductivity by the hot wire method (parallel), AFNOR (2005).

[212]ISO 834-1, E.d.r.a.f.-.-É.d.c.-.-P.E.g., ISO 834-1, Essai de résistance au feu -- Éléments de construction -- Partie 1: Exigences générales. 1999.

[213]Lu, J.-X., et al., Improving the performance of architectural mortar containing 100% recycled glass aggregates by using SCMs. Construction and Building Materials, 2017. **153**: p. 975-985.

[214] NF, P. P 18-459–Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique. *Mars*, 2010.

[215]ASTMC.642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, Annual book of ASTM standards, 2006. **4**(02).

[216]EN, B., 13057; Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures—Test Methods—Determination of Resistance of Capillary Absorption. BSI Standards Publication: London, UK, 2002.

[217]Concrete, A.I.C.C.o. and C. Aggregates, Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing2008: ASTM international.

[218]Browne, F.P., Deicer scaling mechanisms in concrete1972: The Pennsylvania State University.

[219]Fagerlund, G. and M. Setzer. FREEZE-THA W AND DE-ICING RESISTANCE OF CONCRETE. in RILEM Committee TC-117 FDC, Lund Institute of Technology Research Seminar Held in Lund. 1991.

[220]Guelmine, L., The freeze-thaw durability of concrete containing the rubber aggregate of tirewaste. Res. Eng. Struct. Mater, 2022. **8**: p. 253-264.

[221] STANDARD, A. S. T. M. C307-03," Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts and Monolithic Surfacing;,". *Committee C-1 on Cement, ed. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International*, 2012.

[222]ASTMC1260 Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Section, 2007. **4**: p. 676-680.

[223]ASTM C 1760. Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. West Conshohocken (PA): ASTM; 2012.

[224] CALLISTER JR, William D. et RETHWISCH, David G. *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons, 2020.

[225] JOSHI, Prakash et CHAN, Cesar. Rapid chloride permeability testing. *Concrete Construction*, 2002, vol. 47, no 12, p. 37-43.

[226]Domone, P., *Mortar tests for material selection and mix design of SCC.* Concrete International, 2006. **28**(4): p. 39-45.

[227] Boukhelkhal, Dj.; Boukendakdji, O.; Kenai, S.; Bachene, S. Effect of mineral admixture type on stability and rheological properties of self-compacting concrete, Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France. ffhal-01167737, May 2015.. https://hal.science/hal-01167737

[228]Jain, A., R. Gupta, and S. Chaudhary, *Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash.* Construction and Building Materials, 2020. **262**: p. 120516.

[229] Boukhelkhal, Dj.; Guendouz, M. The use of non-destructive tests to estimate Self-compacting concrete compressive strength. MATEC Web of Conferences, v. 149, p. 01036, 2018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901036

[230] Boukhelkhal, Dj.; Guendouz, M.; Bourdot, A.; Cheriet, H.; Messaoudi, K. Elaboration of bio-based building materials made from recycled olive core. MRS Energy & Sustainability, v. 8, p. 98-109, 2021.https://doi.org/10.1557/s43581-021-00006-8

[231] Mageswari, M., et al., *To increase the strength of concrete by adding seashell as admixture.* International Journal of Advanced Research in Civil, Structural, environmental and Infrastructure Engineering and Developing, 2016. **2**(2): p. 165-174.

[232] EFNARC, Specification. Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk, UK. *English ed., February*, 2002.

[233]Assaad, J.J. and M. Saba, *Use of Seashell and Limestone Fillers in Metakaolin-Based Geopolymers for Masonry Mortars.* Minerals, 2023. **13**(2): p. 186.

[234] H.M. Hamada, F. Abed, B. Tayeh, M.S.Al Jawahery, A. Majdi, S.T. Yousif, Effect of recycled seashelles on concrete properties: A comprehensivereview of the recent studies, Constr. Bluid. Mater. 376 (2023), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131036.

[235] B. Yang, J.G. Jang, Environmentally benign production of one-part alkali-activated slag with calcined oyster shell as an activator, Constr. Build. Mater. 257 (2020) 119552, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119552.

[236]Mohammed, A., A. Salih, and H. Raof, Vipulanandan constitutive models to predict the rheological properties and stress-strain behavior of cement grouts modified with metakaolin2020: ASTM International.

[237] S.A. Stel'makh, E.M. Shcherban, A.N. Beskopylny, L.R. Mailyan, B. Meskhi, S.Sh Tashpulatov, A. Chernil'nik, N. Shcherban, A. Tyutina, Composition, Technological, and microstructural aspects of concrete modified with finely ground mussel shell powder, Materials 16 (1) (2023) 82, https://doi.org/10.3390/ ma16010082.

[238] S. Tangaramvong, P. Nuaklong, M.T. Khine, P. Jongvivatsakul, The influences of granite industry waste on concrete properties with different strength grades,Case Stud. Constr. Mater. 15 (2021) e00669, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00669.

[239]Borges, P.H., et al., Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. Cement and concrete research, 2010. **40**(2): p. 284-292.

[240]Reddy, M.V.S., et al., Durability aspects of standard concrete. International Journal of Structural and Civil engineering research, 2013. **2**(1): p. 40-46.

[241] J. Wang, E. Liu, Upcycling waste seashells with cement: Rheology and early-age properties of Portland cement paste, Res. Conser. Recy. 155 (2020) 104680,https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104680.

[242] A. Karimipour, H. Jahangir, D.R. Eidgahee, A thorough study on the effect of red mud, granite, limestone and marble slurry powder on the strengths of steelfibres-reinforced self-consolidation concrete: experimental and numerical prediction, J. Build. Eng. 44 (2021) 103398, https://doi.org/10.1016/j. jobe.2021.103398.

[243] K. Yamaguchi, S. Hashimoto, Cold sintering of calcium carbonate derived from seashells, Open Ceramics 12 (2022) 100302, https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100302.

[244] Dj Boukhelkhal, M. Guendouz, A. Bourdot, H. Cheriet, K. Messaoudi, Elaboration of bio-based building materials made from recycled olive core, MRS Energy & Sustainab. 8 (2021) 98–109, https://doi.org/10.1557/s43581-021-00006-8.

[245] H. Binici, O. Aksogan, Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate, J. Build. Eng. 19 (2018) 109–121, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.022.

[246] K.H. Mo, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, S.C. Lee, W.I. Goh, C.W. Yuen, Recycling of seashell waste in concrete: a review, Constr. Build. Mater. 162 (2018) 751–764, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009.

[247] W. Okoro, S. Oyebisi, Mechanical and durability assessments of steel slag-seashell powder-based geopolymer concrete, Heliyon 9 (2023) e13188, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13188.

[248]Cheah, C.B., J.S. Lim, and M.B. Ramli, The mechanical strength and durability properties of ternary blended cementitious composites containing granite quarry dust (GQD) as natural sand replacement. Construction and Building Materials, 2019. **197**: p. 291-306.

[249]Ulucan, Z.Ç., K. Türk, and M. Karataş, Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008. **44**(5): p. 367-374.

[250] M.H. Ahsan, M.S. Siddique, S.H. Farooq, M. Usman, M.A.U. Aleem, M. Hussaina, A. Hanif, Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures, J. Build. Eng. 50 (2022) 104226, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104226.

[251] Guermiti, L.; Benamara, D.; Guendouz, M. Experimental and numericalinvestigation of the workability and mechanical properties of High-performance fiber-reinforcedfluidconcrete(HPFRFC).Internationaljournalofadvancedstudiesincomputerscience and engineering, IJASCSE, v. 11, p. 8-25, 2022. https://new.ijascse.org/IJASCSE-volume-11-issue-05.html

[252]Bisht, K. and P. Ramana, Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate. Construction and Building Materials, 2018. **177**: p. 116-124.

[253]Mashaly, A.O., B.N. Shalaby, and M.A. Rashwan, Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. Construction and Building Materials, 2018. **169**: p. 800-818.

[254]Singh, S., R. Nagar, and V. Agrawal, Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. Journal of Cleaner Production, 2016. **127**: p. 172-182.

[255] F. Soltanzadeh, et al., Development and characterization of blended cements containing seashell powder, Constr. Build. Mater. 161 (2018) 292–304,https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.111.

[256] P. Sangeetha, M. Shanmugapriya, K.S. Saravanan, P. Prabhakaran, V. Shashankar, Mechanical properties of concrete with seashell waste as partial replacement of cement and aggregate, Mater. Today: Proc. 61 (2022) 320–326, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.501.

[257]Divakar, Y., S. Manjunath, and M. Aswath, Experimental investigation on behaviour of concrete with the use of granite fines. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2012. **1**(4): p. 84-87.

[258]Arivumangai, A. and T. Felixkala, Strength and durability properties of granite powder concrete. J. Civ. Eng. Res, 2014. **4**(10.5923): p. 1-6.

[259]Hamada, H.M., et al., Effect of recycled seashells on concrete properties: A comprehensive review of the recent studies. Construction and Building Materials, 2023. **376**: p. 131036.

[260] Guendouz, M.; Debieb, F.; Boukendakdji, O.; Kadri, E. H.; Bentchikou, M.; Soualhi, H. Use of plastic waste in sand concrete. Journal of Materials and Environmental Science, v. 7, p. 382-389, 2016. https://www.jmaterenvironsci.com/Journal/vol7-2.html

[261]Shekarchi, M., et al., Transport properties in metakaolin blended concrete. Construction and Building Materials, 2010. **24**(11): p. 2217-2223.

[262] JAIN, Abhishek, CHOUDHARY, Rakesh, GUPTA, Rajesh, *et al.* Abrasion resistance and sorptivity characteristics of SCC containing granite waste. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, p. 524-528.

[263]Sharma, N.K., et al., Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. Construction and Building Materials, 2017. **151**: p. 158-163.

[264] Hadjadj, M.; Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj. Mechanical strength and compactness of bio self-compacting sand concrete containing granite industrial waste as fine aggregate, Studies in Engineering and Exact Sciences, Curitiba, v.5, n.3, p.01-22, 2024. DOI: 10.54021/seesv5n3-038

[265]Chao-Lung, H., B. Le Anh-Tuan, and C. Chun-Tsun, Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. Construction and building materials, 2011. **25**(9): p. 3768-3772.

[266]Asadi Shamsabadi, E., et al., Performance of concrete with waste granite powder: The effect of superplasticizers. Applied Sciences, 2018. **8**(10): p. 1808.

[267]Liu, H.-Y., H.-S. Wu, and C.-P. Chou, Study on engineering and thermal properties of environment-friendly lightweight brick made from Kinmen oyster shells & sorghum waste. Construction and Building Materials, 2020. **246**: p. 118367.

[268]Narayanan, N. and K. Ramamurthy, Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement and Concrete composites, 2000. **22**(5): p. 321-329.

[269] BOUCHENAFA, Hafidha, Hayet TERKMANE, and Mohamed GUENDOUZ. "Elaboration d'un éco-matériau de construction à base des isolants recyclés." (2021).

[270] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj.; Triki, Z.; Mechantel, A.; Boukerma, T. Effect of using spent coffee grounds wastes as aggregates on physical and thermal properties of sand concrete. Algerian Journal of Environmental Science and Technology, v. 9, n. 3, p. 3256 – 3264, 2023b.

[271] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj.; Mechantel, A.; Boukerma, T. Valorization of coffee waste as bio-aggregates in crushed sand concrete production. Environmental Engineering and Management Journal, v. 22, n. 1, p. 147-156, 2023a. http://doi.org/10.30638/eemj.2023.013,

[272] Guendouz,M.;Boukhelkhal,Dj. Propertiesofdunesandconcretecontaining coffee waste. MATEC Web of Conférences, v. 149, p. 01039, 2018c. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901039

[273]Zhou, Q. and F.P. Glasser, Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at< 120 C. Cement and Concrete Research, 2001. **31**(9): p. 1333-1339.

[274] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj. Physical, mechanical and thermal properties of Crushed Sand Concrete containing Rubber waste. MATEC Web of Conferences, v. 149, p. 01076, 2018b. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901076

[275]H. Silva, T., et al., The potential use of oyster shell waste in new value-added by-product. Resources, 2019. **8**(1): p. 13.

[276]Janotka, I. and T. Nürnbergerová, Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. Nuclear Engineering and design, 2005. **235**(17-19): p. 2019-2032.

[277]Poon, C.-S., et al., Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. Cement and concrete composites, 2003. **25**(1): p. 83-89.

[278]Shukri, N.A., et al. Effects of elevated temperature on high performance concrete incorporating of metakaolin and garnet. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. IOP Publishing.

[279] Bouziani, Tarek, and Mohamed GUENDOUZ. "Propriétés physico-mécanique et thermique d'un éco-matériau de construction a base des fibres Posidonie oceanique." (2021).

[280]Phan, L.T., J.R. Lawson, and F.L. Davis, Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. Materials and structures, 2001. **34**: p. 83-91.

[281]Ahsan, M.H., et al., Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures. Journal of Building Engineering, 2022. **50**: p. 104226.

[282]Morsy, M.S. and S.S. Shebl, Effect of silica fume and metakaoline pozzolana on the performance of blended cement pastes against fire. Ceramics Silikaty, 2007. **51**(1): p. 40.

[283] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj. Physical and mechanical properties of cement mortar made with brick waste. MATEC Web of Conferences, v. 149, p. 01077, 2018a. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901077

[284]Binici, H., et al., Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite. Construction and Building Materials, 2012. **30**: p. 826-832.

[285] SAHA, Ashish Kumer et SARKER, Prabir Kumar. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 123, p. 135-142.

[286] BADAOUI, Ahmed, Hicham KEFFAZ, and Mohamed GUENDOUZ. "Valorisation des déchets de coquillage dans le béton de sable fluide." (2020).

[287]Brouxel, M., The alkali-aggregate reaction rim: Na2O, SiO2, K2O and CaO chemical distribution. Cement and Concrete Research, 1993. **23**(2): p. 309-320.

[288] Guendouz,M.;Boukhelkhal, Dj.Recyclingofrubberwasteinsandconcrete. Journal of building materials and structures, v. 4, p. 42-49, 2017. https://doi.org/10.34118/jbms.v4i2.30

[289]C. Shi, J.A.S., R.J. Caldwell, Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the and M.J.-. rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results.

[290]Qasem, A., M. Almekhlafi, and F. Yahaya. The Effect of Palm Oil Fuel Clinker Powder and Cockleshell Powder as Cement Replacement on Durability Properties of the Concrete Mortar. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. IOP Publishing.

[291]Beddoe, R.E., Modelling acid attack on concrete: Part II. A computer model. Cement and concrete research, 2016. **88**: p. 20-35.

[292]Nascimento, J.H.O., et al., Efeito do ataque ácido em compósitos portland/latex para cimentação de poços de petróleo. 2007.

[293] Boukhelkhal, Dj.; Guendouz, M.; Triki, Z. Physical and thermal properties of lightweight self-compacting mortar made with recycled walnut shells as fine aggregates. Algerian Journal of

Environmental Science and Technology, v. 9, 2023, https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/898

[294]Liang, C.-F. and H.-Y. Wang, Feasibility of pulverized oyster shell as a cementing material. Advances in Materials Science and Engineering, 2013. **2013**.

[295]Oyebisi, S., et al., Geopolymer concrete incorporating agro-industrial wastes: Effects on mechanical properties, microstructural behaviour and mineralogical phases. Construction and Building Materials, 2020. **256**: p. 119390.

[296]Okoro, W. and S. Oyebisi, Mechanical and durability assessments of steel slag-seashell powder-based geopolymer concrete. Heliyon, 2023. **9**(2).

[297]Oyebisi, S., et al., Assessment of activity moduli and acidic resistance of slag-based geopolymer concrete incorporating pozzolan. Case Studies in Construction Materials, 2020. **13**: p. e00394.

[398]Abouelnour, M.A., et al., Recycling of marble and granite waste in concrete by incorporating nano alumina. Construction and Building Materials, 2024. **411**: p. 134456.

[299] ASTM C1872, Standard Test Method for Thermogravimetric Analysis of Hydraulic Cement, ASTM, ASTM International, 2018.

[300]Hallet, V., et al., Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy. Cement and Concrete Research, 2022. **151**: p. 106624.

[301]Boudjema, Mohamed, Ahmed Kennoudi, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence de déchets d'aluminium sur les performances de Béton de sable fluide." (2020).

[302] RIALI, Asmaa, HAMMOUCHE, Ibtihal, et GUENDOUZ, Mohamed. Caractéristiques physico-mécaniques du béton du sable fluide à base des déchets céramique rouge. 2020.

[303] BACHENE, Sihem, GUENDOUZ, Mohamed, et al. Elaboration d'un éco-matériau de construction à base de déchets de céramiques blanc. 2020.

[304]Wei, Y., et al., Quantitative evaluation of hydrated cement modified by silica fume using QXRD, 27Al MAS NMR, TG–DSC and selective dissolution techniques. Construction and Building Materials, 2012. **36**: p. 925-932.

[305] Yang, B. and J.G. Jang, Environmentally benign production of one-part alkali-activated slag with calcined oyster shell as an activator. Construction and Building Materials, 2020. **257**: p. 119552.

[306] Safi, B., et al., The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM). Construction and Building Materials, 2015. **78**: p. 430-438.

[307]Gong, Y.a., et al., Feasibility study on the preparation of ternary cement with calcined slag powder and seashell powder as supplementary cementitious materials. Construction and Building Materials, 2023. **409**: p. 134223.

[308] Felipe-Sesé, M., D. Eliche-Quesada, and F. Corpas-Iglesias, The use of solid residues derived from different industrial activities to obtain calcium silicates for use as insulating construction materials. Ceramics International, 2011. **37**(8): p. 3019-3028.

[309]Wang, H., et al., Synergistic effects of supplementary cementitious materials in limestone and calcined clay-replaced slag cement. Construction and Building Materials, 2021. **282**: p. 122648.

[310]Xiao, J., J. Li, and C. Zhang, Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and concrete research, 2005. **35**(6): p. 1187-1194.

[311]Shi, C., A.F. Jiménez, and A. Palomo, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. Cement and concrete research, 2011. **41**(7): p. 750-763.

[312]Azevedo, F., et al., Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. Construction and building materials, 2012. **34**: p. 186-191.

[313]Sudjono, P. and C.O. Yudhi, Estimasi Emisi CO2 Dari Pembangunan Berbagai Ukuran Rumah Sederhana. Jurnal Teknik Lingkungan, 2011. **17**(2): p. 98-109.

[314]Soltanzadeh, F., et al., A life-cycle approach to integrate environmental and mechanical properties of blended cements containing seashell powder. Sustainability, 2021. **13**(23): p. 13120.

[315]Surra, E., et al., Technical, environmental, and cost assessment of granite sludge valorisation. Applied Sciences, 2023. **13**(7): p. 4513.

[316] HADJADJ, Moussa, GUENDOUZ, Mohamed, et BOUKHELKHAL, Djamila. Effect of high temperature on the microstructure and residual strength of green flowable sand concrete produced with granite waste and seashell powder. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 2024, vol. 5, no 3, p. e12926-e12926, DOI: 10.54021/seesv5n3-128.

[317] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj.; Bourdot, A.; Babachikh, O.; Hamadouche, A. The effect of ceramic wastes on physical and mechanical properties of eco-friendly flowable sand concrete. Ceramic Materials. IntechOpen, p. 10-12, 2020, DOI: 10.5772/intechopen.95041.

[318] HADJADJ, Moussa, Abdelrahman ZANAGUI, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence couplé de déchets plastique et de céramique sur les performances du béton autoplacant." (2020).