

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté des Sciences
Département : Génie civil
Réf : D012124012D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع : D012124012D

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

En génie civil

Option : Géo-Matériaux

Thème

Incorporation de déchets industriels dans la formulation des bétons à hautes performances à base de matériaux locaux

Présentée par :

ABBAS YASSINE

Dirigée par

M^r. Dr. Djebien Rachid

Soutenue publiquement, le 19/06/2024, devant le jury composé de :

MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda	Président
DJEBIEN Rachid	MCA	Université de Skikda	Rapporteur
DERABLA Riad	MCA	Université de Skikda	Examineur
MERDAS Abdelghani	Professeur	Université de Sétif	Examineur
BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma	Examineur
MEZHOUD Sammy	MCA	Université de Constantine 1	Examineur

Dédicace

*À ceux qui ont toujours fait preuve de dévouement et de sacrifice pour moi ; ceux qui m'ont encouragé et soutenu face aux défis de la vie, m'incitant à donner le meilleur de moi-même ; en signe de gratitude éternelle, je dédie cette thèse en premier lieu **à la mémoire de mon cher père défunt et à ma chère mère**, que Dieu la protège.*

A toute ma famille

A mon encadreur

A tout mes collègues

A tout mes amis

Remerciements

D'abord et avant tout, je dois remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la patience avec lesquels cette thèse a été achevée.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Monsieur **Dr. Rachid DJEBIEN**, Maître de Conférence "A" à l'Université de Skikda, pour son aide efficace lors de la réalisation de cette thèse, sa grande disponibilité, ses conseils et ses encouragements ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée et pour le temps qu'il m'a consacré.*

Je remercie aussi les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger notre travail :

- *Monsieur **Messast Salah**, Professeur à l'université de Skikda, Président du jury ;*
- *Monsieur **Derabla Riad**, MCA, à l'université de SKIKDA, Examineur ;*
- *Monsieur **Merdas Abdelghani**, Professeur, à l'université de Sétif, Examineur ;*
- *Monsieur **Belachia Mouloud**, Professeur à l'université de Guelma, Examineur ;*
- *Monsieur **Mezhoud Sammy**, MCA, à l'université de Constantine, Examineur ;*

Un remerciement particulier que je souhaite adresser au directeur du centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB), Mr SOUICI Messaoud et au chef de département de génie civil au centre universitaire de TIPAZA, Mr OUAHAB Mohamed Younes qui m'ont autorisé à réaliser la partie expérimentale au niveau de leurs laboratoires de recherche.

Mes sincères remerciements vont également à toute l'équipe de SIKA Algérie et Granitex, qui ont contribué à la réalisation de ce travail par la fourniture de super plastifiant, le laitier de haut fourneau broyé et de la fumée de silice.

Je n'oublie pas de remercier tous les enseignants de la Faculté de Génie Civil à l'université de Skikda et au centre universitaire de Tipaza pour leurs patiences et servitude. Ils ont contribué à nous transmettre leur savoir pour assurer notre formation.

Je remercie tous mes collègues de travail, Ouahab Mohamed Younes, Toubal seghir Nadhir et Sabri REMREM pour leur amitié, leurs conseils et leur aide durant toutes les années de travail avec eux, et pour tous les moments que nous avons passés ensemble sans oublier de remercier tous mes amis de la promotion.

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille, à mes chers frères, ma sœur et en particulier ma chère mère qui m'a soutenu durant mes études et qui m'a toujours encouragé. Sa générosité est inestimable.

J'associe, enfin, à ces remerciements tous ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé

Le présent travail étudie l'effet d'incorporation des sous-produits industriels tels que la fumée de silice et le laitier de haut fourneau broyé dans la composition du Béton à Haute Performance sur les performances de celui-ci. Il explore aussi la possibilité d'introduction du déchet de marbre dans la composition du béton à hautes performances par substitution partielle du sable ordinaire. Différents mélanges de béton à hautes performances contenant de la fumée de silice et du laitier de haut fourneau broyé en remplacement du ciment ont été préparés. Ensuite, le déchet de marbre a été introduit dans la composition du béton à hautes performances par substitution volumétrique du sable ordinaire par (5%, 10% et 15%) de poudre de marbre dans une première étape, et par (10 %, 20 %, 30 % et 40 %) de sable de marbre dans une deuxième étape. Les propriétés à l'état frais ont été étudiées à l'aide d'essais d'affaissement, de densité à l'état frais et d'air occlus, tandis que les propriétés à l'état durci ont été évaluées à l'aide d'essais de résistance à la compression et à la flexion, de vitesse d'impulsion ultrasonique, d'absorption d'eau, de module d'élasticité dynamique et d'attaques chimiques par H_2SO_4 et HCl . Les résultats obtenus ont montré que les bétons à hautes performances contenant de déchets de marbre sous forme de poudre ou de sable avaient de meilleures performances que ceux sans substitution du sable par ces derniers. Et que l'introduction de sable de marbre dans la composition du Béton à Haute Performance a amélioré de manière significative les propriétés à l'état frais et durci du Béton à Haute Performance, et l'a rendu plus performant et plus résistant aux attaques d'acides chimiques. Les meilleures performances ont été obtenues pour une composition à base de laitier de haut fourneau broyé et contenant 40% de sable de marbre. Cette composition a montré une augmentation de la résistance à la compression de 30.98%.

Mots clés : Béton à Haute Performance, Déchets, Fumé de Silice, Laitier, Marbre, Propriétés, Sable.

Abstract

The present work studies the effect of incorporating industrial by-products such as silica fume and ground blast furnace slag on the behaviour of high-performance concrete. Additionally, it explores the possibility of introducing marble waste into the composition of high-performance concrete by partially substituting ordinary sand. Different high performances concrete mixtures containing silica fume and ground blast furnace slag as cement replacement were prepared. Then, marble waste was introduced as fine aggregate in the composition of high performances concrete by volumetric substitution of ordinary fine aggregates with (5%, 10% and 15%) marble powder in the first stage and (10%, 20%, 30% and 40%) marble sand in the second stage. The fresh properties were investigated using slump, fresh density and air content tests, while the hardened properties were evaluated through the compressive and flexural strengths, ultrasonic pulse velocity, water absorption, dynamic elastic modulus and chemical acids attacks tests by H_2SO_4 et HCl . The results showed that high-performance concrete containing marble waste in the form of powder or sand exhibited better performance than those without the substitution of sand by these materials. Furthermore, the introduction of marble waste as fine aggregate in the HPC composition significantly improved the fresh and hardened properties of HPC, and makes it more efficient and resistant to the chemical acid attacks. The best performances were obtained for the composition based ground blast furnace slag and containing 40% of marble sand which exhibited an increase in the compressive strength by 30.98%.

Keywords: high performance concrete, marble, sand, silica fume, slag, properties, wastes.

ملخص

يدرس هذا العمل تأثير الإضافات الصناعية في تركيب الخرسانة عالية الأداء على أدائها من جهة ويكشف إمكانية إدخال نفايات الرخام في تركيب الخرسانة عالية الأداء عن طريق الاستبدال الجزئي للرمل العادي. تم تحضير العديد من الخلطات الخرسانية عالية الأداء التي تحتوي على دخان السيليكا وخبث فرن الصهر المحطم كبديل للأسمت. بعد ذلك، تم إدخال نفايات الرخام كرمال ناعم في تركيب الخرسانة عالية الأداء عن طريق الاستبدال الحجمي للرمل الناعم العادي ب (5%، 10% و 15%) من مسحوق الرخام كمرحلة أولى وب (10%، 20%، 30% و 40%) من رمل الرخام كمرحلة ثانية. تم فحص الخصائص الرطبة باستخدام اختبارات الركود والكثافة الرطبة ومحتوى الهواء، بينما تم تقييم الخصائص الصلبة باستخدام اختبارات مقاومة الانضغاط وقوة الانثناء وسرعة النبض فوق الصوتي وامتصاص الماء والمعامل الديناميكي للمرونة والهجوم الحمضي الكيميائي لمحلول الهيدروكلوريك والكبريت. أظهرت النتائج أن الخرسانة عالية الأداء التي تحتوي على نفايات الرخام على شكل مسحوق أو رمل أظهرت أداءً أفضل من تلك التي لا تحتوي على استبدال الرمل بهذه المواد. علاوة على ذلك أدى إدخال نفايات الرخام كمجموعات دقيقة في تركيب الخرسانة عالية الأداء إلى تحسين الخصائص الرطبة والصلبة للخرسانة عالية الأداء بشكل كبير، وجعلها أفضل وأكثر مقاومة لهجوم الأحماض الكيميائية. أفضل النتائج تم الحصول عليها للتركيب التي تعتمد على خبث فرن الصهر المحطم وتحتوي على 40% من رمل الرخام، والتي أظهرت زيادة في مقاومة الانضغاط بنسبة 30.98%.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة عالية الأداء، الرخام، النفايات، الرمل الناعم، الخصائص دخان السيليكا، خبث فرن الصهر

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	2
Chapitre 1 : Etat de connaissances	7
1.1. Introduction	7
1.2. Béton à hautes performances	7
1.2.1. Définitions	7
1.2.2. Histoire des bétons à hautes performances	9
1.2.3. Compositions des bétons à hautes performances	9
1.2.3.1. Ciment	10
1.2.3.2. Matériaux cimentaires supplémentaires	10
1.2.3.3. Adjuvants	11
1.2.3.4. Granulats	11
1.2.3.5. Eau de gâchage	13
1.3. Valorisation des déchets dans le domaine de construction	14
1.3.1. Introduction	14
1.3.2. Différents types de déchets et sous produits utilisés en génie civil	15
1.3.2.1. Déchets de marbre en poudre et en sable	15
1.3.2.2. Fumée de silice	16
1.3.2.3. Laitier broyé de haut fourneau	17
1.4. Effet des ajouts minéraux et du déchet de marbre sur les propriétés des bétons hydrauliques	18
1.4.1. Effet de la fumée de silice et laitier de haut fourneau broyé	18
1.4.2. Effet de déchet de marbre	19
1.5. Conclusion	21
Chapitre 2 : Caractéristiques des matériaux et procédures expérimentales	23
2.1. Introduction	23
2.2. Caractérisation des matériaux utilisés	23
2.2.1 Ciment	23
2.2.2. Granulats	25
2.2.3. Poudres	27

2.2.4. Adjuvants.....	29
2.2.5. Eau de gachage	29
2.3. Préparation et conditionnement des échantillons de béton à hautes performances.....	23
2.3.1 Formulation et composition des bétons à hautes performances	28
2.3.2. Fabrication des mélanges.....	33
2.3.3. Eprouvettes	34
2.3.4. Conservation.....	34
2.4. Modes opératoires des essais.....	36
2.4.1 Essais à l'état frais	36
2.4.1.1 Affaissement au cône d'Abrams.....	36
2.4.1.2. Teneur en air occlus.....	37
2.4.1.3. Densité.....	37
2.4.2. Essais à l'état durci	38
2.4.2.1. Résistance à la compression	38
2.4.2.2. Résistance à la flexion par flexion.....	38
2.4.2.3. Essai au Scléromètre.....	39
2.4.2.4. Essai aux ultrasons	39
2.5. Essai de durabilité.....	39
2.5.1. Absorption d'eau par immersion	40
2.5.2. Absorption d'eau par capillarité	41
2.5.3. Essai d'attaque chimique par les acides	42
2.6. Conclusions	43
Chapitre 3 : Etude du comportement physico-mécanique des BHP	46
3.1. Introduction	46
3.2. Effet de l'introduction de PM sur les propriétés du BHP.....	46
3.2.1. Ouvrabilité.....	46
3.2.2. Densité	47
3.2.3. Teneur en air occlus.....	48
3.2.4. Résistance à la compression	48
3.2.5. Résistance à la flexion	51
3.2.6. Vitesse des impulsions ultrasoniques	53
3.2.7. Module d'élasticité dynamique	56

3.3. Effet de l'introduction de SM sur les propriétés du BHP.....	57
3.3.1. Ouvrabilité.....	57
3.3.2. Densité	58
3.3.3. Teneur en air occlus.....	59
3.3.4. Résistance à la compression	60
3.3.5. Résistance à la flexion	62
3.3.6. Vitesse des impulsions ultrasoniques	65
3.2.7. Module d'élastique dynamique	66
3.3. Conclusion.....	68
Chapitre 4 : Durabilités des BHP à base de déchets de marbre combinés avec de fumé de silice ou laitier de haut fourneau broyé	71
4.1. Introduction	71
4.2. BHP à base de PM avec FS ou LHFB	71
4.2.1. Absorption d'eau par immersion	71
4.2.2. Absorption d'eau par capillarité.....	72
4.2.3. Attaques chimiques.....	74
4.2.3.1. Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique.....	74
4.2.3.2. Résistance à l'attaque par l'acide hydrochlorique.....	78
4.3. BHP à base de SM avec FS ou LHFB.....	82
4.3.1. Absorption d'eau par immersion	82
4.3.2. Absorption d'eau par capillarité.....	83
4.3.3. Attaques Chimiques.....	85
4.3.3.1. Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique	86
4.3.3.2. Résistance à l'attaque par l'acide hydrochlorique.....	89
4.4. Conclusion	92
Conclusions générales et perspectives.....	95
Références bibliographiques.....	99
Annexes.....	111

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Déffirents formes de granulats.....	12
Figure 1.2 : Evolution de la résistance dans le béton haute performance fabriqué avec différents types de granulats	13
Figure 1.3 : Caractéristiques microstructurales des BHP par rapport de béton.....	19
Figure 2.1 : Granulats utilisés.....	26
Figure 2.2 : Distribution granulométrique des granulats.....	26
Figure 2.3 : PM et les additions minirales utilisés.....	27
Figure 2.4 : Malaxeur de béton à axe horizontal utilisé.	34
Figure 2.5 : Remlissage des éprouvettes	34
Figure 2.6 : Conservation des échantillons de BHP après démoulage.	35
Figure 2.7 : Essai d'affaissement au cone d'Abrams.	36
Figure 2.8 : Mesure de la teneur en air occlus à l'aide de l'aéromètre.....	37
Figure 2.9: Mesure de la densité.....	38
Figure 2.10 : Dispositif de l'essai de compression et de traction par flexion.....	39
Figure 2.11 : Essai non desstructif au scléromètre et à l'ultrason.....	39
Figure 2.12 : Essai d'absorption par immersion.....	40
Figure 2.13 : Essai d'absorption par capillaire.....	41
Figure 2.14 : Etat des éprouvettes des BHP immergées dans différentes solutions.....	42
Figure 2.15 : Organigramme de la démarche expérimentale.....	44
Figure 3.1 : Manialbilité des mélanges de BHP.	47
Figure 3.2 : Valeurs de densité des mélanges de BHP	47
Figure 3.3 : Valeurs de la teneur en air occlus des mélanges de BHP.	48
Figure 3.4 : Valeurs de la résistance mécanique des mélanges de BHP.	49
Figure 3.5 : Influence du mode de cure sur la résistance mécanique à 28 jours de mélanges de BHP.	50
Figure 3.6 : Valeurs de la résistance à la flexion des mélanges de BHP.....	51
Figure 3.7 : Influence du mode de cure sur la résistance à la flexion à 28 jours de mélanges de BHP.	52

Figure 3.8 : Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression à différents ages pour :(a)BHP+PM% ; (b)BHPFS+PM% ; (c)BHPLHFB+PM%	53
Figure 3.9 : Valeurs de VIU des mélanges de BHP à différents ages pour :(a)BHP+PM% ; (b)BHPFS+PM% ; (c)BHPLHFB+PM%	54
Figure 3.10 : La relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion, ainsi que la densité et la vitesse d'impulsion des mélanges de BHP à différents ages pour :(a)BHP+PM% ; (b)BHPFS+PM% ; (c)BHPLHFB+PM%.....	56
Figure 3.11 : Valeurs du module d'élasticité dynamique des mélanges de BHP	57
Figure 3.12 : Maniabilité des mélanges de BHP.	58
Figure 3.13 : Valeurs de densité des mélanges de BHP.	59
Figure 3.14 : Valeurs de la teneur en air occlus des mélanges de BHP	60
Figure 3.15 : Valeurs de la résistance mécanique des mélanges de BHP.	61
Figure 3.16 : Influence du mode de cure sur la résistance mécanique à 28 jours de mélanges de BHP.....	62
Figure 3.17 : Valeurs de la résistances à la flexion des mélanges de BHP.	63
Figure 3.18 : Influence du mode de cure sur la résistance à la flexion à 28 jours de mélanges de BHP.....	63
Figure 3.19 : Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression à différents ages pour :(a)BHP+SM% ; (b)BHPFS+SM% ; (c)BHPLHFB+SM%	65
Figure 3.20 : Valeurs de VIU des mélanges de BHP.	66
Figure 3.21 :Relation entre la résistance la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion des mélanges de BHP.....	66
Figure 3.22 : Valeurs du module d'élasticité dynamique des mélanges de BHP.....	67
Figure 4.1 : Absorption d'eau par immersion des mélanges de BHP.	71
Figure 4.2 : Absorption d'eau par capillarité des mélanges de BHP en fonction du temps pour : (a)BHP+PM% ; (b)BHPFS+PM% ; (c)BHPLHFB+PM%.	74
Figure 4.3 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄) des mélanges de BHP.....	75
Figure 4.4 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄) des mélanges de BHP.....	76
Figure 4.5 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans H ₂ SO ₄ pour : (a)BHP+PM% ; (b)BHPFS+PM% ; (c)BHPLHFB+PM%.	78

Figure 4.6 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide hydrochlorique (HCl) des mélanges de BHP.....	79
Figure 4.7 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide hydrochlorique (HCl) des mélanges de BHP.....	81
Figure 4.8 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans HCl pour : (a)BHP+PM% ; (b)BHPFS+PM% ; (c)BHPLHFB+PM%.....	82
Figure 4.9 : Absorption d'eau par immersion des mélanges de BHP	83
Figure 4.10 : Absorption d'eau par capillarité des mélanges de BHP en fonction du temps pour : (a)BHP+SM% ; (b)BHPFS+SM% ; (c)BHPLHFB+SM%.	85
Figure 4.11 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄) des mélanges de BHP	86
Figure 4.12 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄) des mélanges de BHP.....	87
Figure 4.13 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans H ₂ SO ₄ pour : (a)BHP+SM% ; (b)BHPFS+SM% ; (c)BHPLHFB+SM%.	88
Figure 4.14 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide hydrochlorique (HCl) des mélanges de BHP.....	89
Figure 4.15 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide hydrochlorique (HCl) des mélanges de BHP.....	90
Figure 4.16 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans HCl pour : (a)BHP+SM% ; (b)BHPFS+SM% ; (c)BHPLHFB+SM%.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM I 425.....	23
Tableau 2.2 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPO CEM I 52.5.....	24
Tableau 2.3 : Propriétés physiques et mécaniques du ciment CEM I 425	24
Tableau 2.4 : Propriétés physiques et mécaniques ciment CPO CEM I 52.5.....	25
Tableau 2.5 : Propriétés des granulats	26
Tableau 2.6 : Propriétés physico-mécaniques de la poudre de marbre utilisée.....	27
Tableau 2.7 : Composition chimique de la poudre de marbre utilisée.....	28
Tableau 2.8 : Propriétés de la fumée de silice (FS) et du laitier de haut fourneau broyé (LHFB)	28
Tableau 2.9 : Cractéristiques physiques d'adjuvant utilisé	29
Tableau 2.10 : Composition de base de BHP témoin par la méthode « Dreux-Gorisse »	30
Tableau 2.11: Désignation des types des BHP testés.....	30
Tableau 2.12: Composition des BHP avec la poudre de marbre.....	32
Tableau 2.13: Composition des BHP avec le sable de marbre.....	33
Tableau 4.1: Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans H ₂ SO ₄ des mélanges de BHP	74
Tableau 4.2: Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans H ₂ SO ₄ des mélanges de BHP.	76
Tableau 4.3: Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCl des mélanges de BHP	78
Tableau 4.4: Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans HCl des mélanges de BHP	80

LISTE DES SYMBOLES

AREHG	Adjuvant réducteur d'eau à haute performance
BHP	Béton à Hautes Performance
BHPFS	Béton à Hautes Performance de Granulat Naturel
BHPLBHF	Béton à Hautes Performance de Granulat Recyclé du 1 ^{er} cycle
CaO	Oxyde de calcium
Ca(OH) ₂	Portlandite
C&D	Construction et Démolition
CPO	Ciment Portland ordinaire
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
DM	Déchets de Marbre
E/C	Eau/Ciment
E _d	Module d'élasticité dynamique
E/L	Eau/Liant
f _c	Résistance à la compression
FS	Fumé de Slice
GES	Gaz à effet de serre
GN	Granulat Naturel
HCl	Acide chlorhydrique
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
HR	Humidité relative
i	Coefficient d'absorption capillaire
K ₂ O	Oxyde de Potassium
LA	Los Angeles
LBHF	Laitier de Haut Fourneau broyé
MCS	Matériaux cimentaires supplémentaires
MK	Métakaolin
MSC	Matériaux de substitution du ciment
M _x	Masse de l'éprouvette à une échéance donnée
M ₀	Masse initiale de l'éprouvette
PM	Poudre de Marbre
Q	Volume d'eau absorbé
S	Coefficient de sportivité
SM	Sable de Marbre
SN	Sable Naturel
SP	Superplastifiant
VIU	Vitesse d'impulsions ultrasoniques
ZTI	Zone de Transition Interfaciale
γ _d	Densité apparente
ρ _{bfrais}	Masse volumique du béton à l'état frais
σ	Ecart type
σ _t	Résistance à la traction

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, le secteur de la construction est le plus grand émetteur de gaz à effet de serre (GES) qui contribue jusqu'à 50% des émissions mondiales de GES (Lui et al. 2020). Le ciment portland (CP) est l'un des ingrédients vitaux du béton qui contribue de manière majeure aux émissions de GES (Bengar et Sourii. 2020). La littérature indique qu'une quantité annuelle de CP de 4000 millions de tonnes est actuellement produite et continuera d'augmenter pour atteindre environ 6000 millions de tonnes d'ici 2060 (Samini et al. 2017). Ces statistiques indiquent la nécessité d'alternatives viables pour répondre aux fortes demandes de béton avec des besoins énergétiques moindres et des émissions de CO₂ moindres (Taji et al. 2019, Tang et al. 2019). L'utilisation des déchets et produits industriels dans le béton est l'un des remèdes scientifiques et réalisables proposés pour atténuer ce qui précède et répondre non seulement à la demande croissante de béton, mais minimisera également le risque environnemental imminent.

Le contexte environnemental mondial a placé la question environnementale au cours des débats scientifiques, plus spécialement les questions de la pollution et de la gestion des déchets. Dans le domaine de génie civil, le béton est un des matériaux les plus utilisés dans la construction, et le besoin en granulats, un de ces principaux composants, s'élève chaque année et s'épuise les carrières de granulats. Ce qui a poussé les chercheurs de trouver de nouvelles sources d'approvisionnement en matières premières (Huang et al. 2020, Youssef et al. 2020). Il convient par conséquent d'optimiser l'utilisation des matériaux standards et surtout les matériaux alternatifs qui sont les déchets et sous-produits industriels dans la fabrication des bétons à haute performance (BHP). L'objectif principale est de limiter l'impact de l'industrie sur l'environnement en matière de préservation des ressources naturelles et la limitation de la pollution (Jalal et al. 2020). L'emploi des matériaux valorisés dans la confection des BHP connaît un essor important ces dernières années et constitue une solution d'avenir, toute fois cette pratique connaît certaine limite, du fait que les déchets et les produits industriels ne présentent pas les mêmes caractéristiques que celles des matériaux standards, aussi, leurs utilisations avec des matériaux standards nécessitent de mettre en place des formulations des BHP qui prennent en compte leurs spécificités.

Dans le secteur de la construction, les déchets et sous-produits industriels, tels que la fumée de silice (FS) et le laitier de haut fourneau broyé (LHFB) ont été utilisés avec succès comme matériaux supplémentaires en remplacement partiel du ciment pour atténuer les impacts

environnementaux associés à sa production et à son utilisation dans le béton (Vieira et al. 2020). La mise en décharge de ces déchets industriels impose de graves risques environnementaux, mais aussi leur utilisation en remplacement partiel du ciment, non seulement réduit la consommation de ressources naturelles utilisées dans la production du ciment, mais constitue également une meilleure alternative à la mise en décharge de ces déchets (Marieta et al. 2011, Tang et al. 2020).

L'épuisement des gisements naturels et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent la recherche d'autres sources d'approvisionnement. (Vardhan et al. 2019) ont noté que les déchets de marbre constituent environ 20 à 30% de la production totale de l'industrie du marbre. En Algérie (Hebhoub et al. 2011) ont noté que 70 % du marbre est jeté lors des étapes d'extraction, de traitement et de polissage. Ces déchets causent des problèmes environnementaux importants (Shian et al. 2018), tels que dégradation de la fertilité et de la morphologie des sols (Zhang et al. 2020), pollution de l'air et colmatage des cours d'eau (Varaharajam. 2020).

La valorisation des déchets de marbre (DM) dans la technologie du béton est une solution viable et efficace afin de répondre au déficit entre production et consommation et protection de l'environnement d'une part et conduire au développement durable d'autre part. Mettre en évidence que la possibilité d'utiliser la poudre de marbre ou le sable de marbre (PM ou SM) dans la fabrication du béton est l'une des principales tendances de recherche pour développer un béton résistant, durable et respectueux à l'environnement. Plusieurs chercheurs ont étudié l'utilisation des déchets de marbre sous forme de granulats et de poudre dans la technologie du béton (Djebien et al. 2015).

C'est dans ce contexte que nous envisageons de travailler sur le développement d'un BHP en utilisant les déchets de marbre en combinaison avec des additifs minéraux tels que la FS et le LHFB. Les recherches menées dans le cadre de cette thèse se concentrent sur l'intégration de DM avec la FS et le LHFB dans le BHP. L'objectif de cette étude expérimentale est de caractériser les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BHP élaborés à partir de DM, FS et LHFB, afin de garantir leur aptitude à une utilisation efficace dans l'industrie de la construction en général. De plus, pour une meilleure compréhension sur le plan scientifique et technologique, la durabilité de ces BHP contenant de la FS, du LHFB, ainsi que du DM sous forme de poudre et de sable, sera étudiée et comparée à celle d'une formulation classique d'un BHP.

Notre travail est analyse comment la substitution du sable par de DM (PM et SM) dans des mélanges de BHP contenant de la FS et du LHFB en remplacement du ciment influence les paramètres de formulation du BHP, ainsi que ses propriétés rhéologiques, mécaniques et sa durabilité. Cette étude vise à évaluer la possibilité d'utiliser ces BHP en tant que matériaux de construction structurels, offrant ainsi des avantages à l'industrie de la construction et contribuant à réduire la demande en granulats et ciment, à préserver l'environnement et à produire un béton écologiquement durable. La thèse est organisée en quatre chapitres.

Après une introduction générale, nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographique regroupée dans le premier chapitre.

Le premier chapitre constitue une revue de la littérature. Dans ce chapitre, nous avons compilé une base de données sur les BHP, en examinant leurs propriétés, leurs domaines d'application, ainsi que les méthodes de formulation associées. En outre, nous avons mené des recherches approfondies sur l'utilisation d'ajouts minéraux dans les BHP, en analysant leurs propriétés et leur influence sur les caractéristiques physico-mécaniques des BHP. Nous avons également présenté des études antérieures pertinentes dans ce domaine.

Une section d'une importance particulière est consacrée à l'exploitation des déchets dans l'industrie de la construction, mettant en lumière la valorisation des DM sous forme de poudre et de granulats. Enfin, nous avons recensé plusieurs études antérieures portant sur l'intégration des DM en tant qu'additifs dans le ciment, ainsi que leur utilisation comme granulats dans les différents types de bétons hydrauliques.

La partie expérimentale regroupe aussi trois chapitres.

Le deuxième chapitre porte sur l'origine et la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude, mettant en avant leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Il englobe les matériaux de base tels que le gravier, le sable, le ciment, l'adjuvant, ainsi que les ajouts minéraux comme la FS et le LHFB, et enfin les déchets tels que le SM et PM. Ce chapitre présente également les résultats des tests de caractérisation effectués sur chaque matériau utilisé dans cette étude.

Ensuite, nous décrivons minutieusement le programme expérimental en présentant le principe de chaque essai, en décrivant le mode opératoire, ainsi qu'en exposant la formulation des différentes compositions et les méthodes de fabrication des mélanges pour chaque essai. Ce chapitre expose en détail les principaux tests réalisés sur les différentes formulations retenues pour cette étude.

Le troisième chapitre regroupe les résultats obtenus ainsi que les interprétations des propriétés des BHP élaborés à partir de DM, de FS et LHFB, à la fois à l'état frais et à l'état durci.

Les résultats expérimentaux sur la durabilité sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux dans le quatrième chapitre. Nous avons étudié l'effet du taux de substitution des SM et PM sur le comportement du BHP, composé de FS et de LHFB, face aux attaques chimiques par des acides (H_2SO_4 et HCl). Les résultats de ces essais sont présentés en termes de perte de résistance et de perte de masse. Ensuite, une analyse des résultats est réalisée, comprenant des discussions et des commentaires.

Une conclusion générale concernant notre travail ainsi que des perspectives d'avenir viennent clore cette étude de recherche.

Chapitre 1 :

Etat de connaissances

Chapitre 1 : Etat de connaissances

1.1. Introduction

Depuis le début des années 1990, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation collective majeure. La question des déchets est omniprésente et affecte la vie quotidienne de chaque individu. Chacun de nous peut et doit jouer un rôle actif dans une gestion plus responsable des déchets, dans le but d'améliorer notre environnement et de préserver le bien-être de tous.

La valorisation des déchets industriels ou naturels par le réemploi, le recyclage, ou toute autre action visant à obtenir des matériaux réutilisables dans l'industrie de la construction, est désormais une technique essentielle. Elle permet non seulement d'améliorer les propriétés à l'état frais du béton à haute performance, mais également d'augmenter ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité.

Ce chapitre offre une revue générale qui couvre l'historique et les principales propriétés des bétons à haute performance. Il présente également diverses données bibliographiques concernant les déchets de marbre, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau broyé, ainsi qu'une discussion sur leur valorisation en tant qu'additifs dans le BHP, remplaçant le sable ou le ciment.

1.2. Béton à haute performances

1.2.1. Définitions

Au fil du temps, différents chercheurs ont tenté de fournir diverses définitions du béton à haute performance (BHP). De nombreuses tentatives ont été faites pour parvenir à une définition précise du BHP.

En 1990, la publication du Programme de Recherche Stratégique sur les Autoroutes (PRSA), rédigée par (Zia. 1991), a établi une première définition du BHP en se concentrant principalement sur la résistance du béton. Les critères essentiels définis par le PRSA sont les suivants :

1. Un rapport eau/ciment (e/c) ne dépassant pas 0,35.
2. Une résistance en compression d'au moins 21 MPa (3045 psi) à quatre heures.
3. Une résistance en compression d'au moins 34 MPa (4930 psi) à 24 heures.
4. Une résistance en compression d'au moins 69 MPa (10005 psi) à 28 jours.

En 1996, le PRSA a précisé davantage sa définition du BHP pour les structures routières, comme présenté par (Goodspeed. 1996). Ils ont identifié huit paramètres considérés comme suffisants pour représenter la performance à long terme du BHP. Ces paramètres comprennent des caractéristiques liées à la résistance au gel-dégel, à l'écaillage, à l'abrasion, à la perméabilité aux chlorures, à la résistance en compression, au module d'élasticité, à la fissuration due au retrait et au fluage. Le BHP a été classé en quatre niveaux différents en fonction de la conformité à ces paramètres. Par exemple, un BHP présentant un retrait compris entre 400 et 600 microdéformations ($\mu\epsilon$) pourrait être classé en tant que Grade 2, tandis qu'un BHP ayant un retrait inférieur à 400 $\mu\epsilon$ serait classé en Grade 3. Une formulation spécifique de BHP pourrait satisfaire aux exigences du Grade 4 en ce qui concerne la résistance et le module d'élasticité, du Grade 3 pour le retrait, et du Grade 2 pour les autres propriétés.

En 1998, American Concrete Institute (ACI) a enfin fourni une définition officielle du BHP, comme détaillé par (Russel. 1999). L'ACI définit le BHP comme "un béton répondant à des combinaisons spéciales d'exigences de performance et d'uniformité qui ne peuvent pas toujours être atteintes de manière routinière en utilisant des constituants conventionnels et des pratiques de mélange, de mise en place et de curing normales." Les caractéristiques spéciales de performance du BHP incluent les suivantes :

- Facilité de mise en place
- Compactage sans ségrégation
- Résistance à un jeune âge
- Propriétés mécaniques à long terme
- Faible perméabilité
- Haute densité
- Faible chaleur d'hydratation
- Résistance
- Stabilité de volume
- Longue durée de vie dans des environnements sévères

Par conséquent, on peut définir le BHP comme un type de béton spécialisé fabriqué à l'aide de matériaux spécifiques tels que des adjuvants réducteurs d'eau à haute gamme (AREHG), des retardateurs, des cendres volantes, du laitier de haut fourneau, de la fumée de

silice, des déchets de marbre et d'autres matériaux cimentaires supplémentaires (MCS). Lorsqu'il est correctement mélangé, transporté, mis en place, consolidé et durci, le BHP peut présenter des caractéristiques de performance supérieures, telles qu'une résistance à la compression élevée pouvant atteindre 200 MPa, une grande densité, une faible perméabilité et une excellente résistance à des conditions environnementales agressives. Cela le rend adapté à diverses applications telles que les barrages, les ponts, les bâtiments, les tunnels et les centrales nucléaires (Zhang et al. 2019).

1.2.2. Histoires du béton à haute performances

Le BHP est apparu pour la première fois sous le nom de Béton à Haute Résistance (BHR). Des années 1960 aux années 1970, dans la région de Chicago (Freedman. 1971), le BHR a été développé et utilisé dans la construction de gratte-ciel en tant que matériau innovant par rapport au béton de résistance normale. En 1986, la France (Malier. 1992) a lancé le projet "Nouvelles voies pour le béton", qui a abouti à la conception du BHP. Deux étapes décisives méritent d'être mentionnées pour le développement du BHP : l'introduction de l'adjuvant réducteur d'eau à haute gamme (AREHG) dans le béton et l'émergence des matériaux cimentaires supplémentaires (MCS). L'utilisation de l'AREHG permet de produire des BHP avec un faible rapport eau-ciment (E/C) entre 0,20 et 0,25 tout en offrant une meilleure maniabilité de 200 mm lors de leur livraison sur chantier. L'ajout de MCS, principalement des matériaux finement divisés qui sont pouzzolaniques et parfois hydrauliques, permet d'obtenir des propriétés techniques spécifiques pour le mortier de ciment et le béton. De petites quantités de fumée de silice, de laitier broyé, de cendre volante, etc., dans les mélanges du BHP peuvent influencer à la fois les propriétés à l'état frais, telles que les caractéristiques de prise, la cohésion, le retrait et la chaleur d'hydratation, ainsi que les propriétés à l'état durci, telles que l'amélioration de la résistance, de la perméabilité, de la durabilité et de la protection de l'acier d'armature contre la corrosion (Siddique. 2011). (Mehta et Aïtcin. 1990) ont conclu que l'utilisation de ces ultrafines dans la fabrication des BHP est devenue un choix indispensable pour que le béton possède les trois caractéristiques suivantes : haute maniabilité, haute résistance et durabilité élevée.

1.2.3. Composition des bétons à hautes performances

Le BHP est fabriqué à partir de matériaux similaires à ceux du béton conventionnel, mais avec des exigences spécifiques en ce qui concerne les propriétés des ingrédients. La qualité des matériaux et la proportionnalité sont d'une importance cruciale pour obtenir une résistance à la compression accrue (Aïtcin. 1998). Cette partie examine certaines propriétés des ingrédients

pertinents, en commençant par le ciment, qui est l'ingrédient principal, puis les matériaux cimentaires supplémentaires, les superplastifiants et les granulats.

1.2.3.1. Ciment

Étant donné que le BHP a une résistance à la compression considérablement élevée (jusqu'à plus de 200 MPa), les propriétés du ciment sont considérées comme cruciales en ce qui concerne la résistance et la rhéologie (Kumar et al. 2017). L'amélioration de la résistance du béton est obtenue en présentant des silicates de calcium, où ce composant contribue à 80 % de la masse totale du ciment Portland (Aitcin. 1998). Par conséquent, le ciment Portland doit évoluer autant de silicate de calcium hydraté (C-S-H) que possible (Aitcin. 1998). La capacité du ciment Portland à développer du (C-S-H) est liée au rapport eau/liant, où la diminution du rapport eau/liant permet au ciment Portland de développer davantage de (C-S-H), ce qui se traduit par une résistance élevée du béton (Aitcin. 1998). Il est également important de mentionner qu'une diminution significative du rapport eau/liant peut être critique compte tenu de la quantité d'eau disponible pour permettre l'hydratation du ciment. Il est donc essentiel d'atteindre un rapport eau/liant approprié dans lequel la rhéologie du béton frais n'est pas altérée (Aitcin. 1998). Du point de vue de la rhéologie, la réduction de la quantité de C₃A dans le ciment Portland utilisé pour le BHP permet un meilleur contrôle de la rhéologie et réduit le risque de problèmes d'interaction ciment-superplastifiant (Kumar et al. 2017).

1.2.3.2. Matériaux cimentaires supplémentaires (MCS)

Les matériaux cimentaires supplémentaires (MCS), également connus sous le nom de matériaux de substitution du ciment (MSC), sont généralement utilisés dans la production de BHP afin de substituer une partie du ciment Portland, ce qui permet de réduire l'émission de CO₂ liée à la production du ciment. Selon (Aitcin. 1998), il est possible de produire du BHP en n'utilisant que du ciment Portland, mais il est plus efficace sur le plan environnemental d'utiliser une combinaison de différents MCS. En plus de l'aspect environnemental, l'utilisation de MCS améliore les propriétés du béton en termes de résistance, de rhéologie et de durabilité (Ramezani pour. 2014). Les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau broyé sont couramment utilisés comme matériaux de substitution du ciment dans le BHP. Il convient de procéder à une sélection appropriée des MCS afin d'éviter une atténuation des propriétés du béton (Meng. 2017). Les différentes proportions de MCS utilisées dans la production de BHP influent sur les propriétés mécaniques telles que la résistance, ainsi que sur les propriétés de durabilité.

1.2.3.3. Adjuvants

Il existe différents types d'adjuvants superplastifiants, et ils influent différemment sur les propriétés mécaniques du béton. Par conséquent, le choix du type et du dosage de l'adjuvant superplastifiant est crucial (Xiao. 2024). Il est également important de mentionner qu'avec l'adjuvant superplastifiant, l'industrie du béton peut produire du béton avec une résistance à la compression très élevée allant jusqu'à 200 MPa en réduisant le rapport eau/ciment à des niveaux jamais atteints auparavant tout en conservant un haut degré de fluidité et de maniabilité (Aitcin. 1998).

Selon (Domone et Illston. 2010), il est plus efficace d'ajouter l'adjuvant superplastifiant après (1 à 2) minutes de mélange du ciment avec l'eau de gâchage pour obtenir la maniabilité désirée. Il est observé qu'ajouter l'adjuvant superplastifiant en même temps que l'eau de gâchage fait réagir une quantité significative d'adjuvant superplastifiant avec le C3A/Gypse, ce qui diminue la maniabilité du mélange de béton (Domone et Illston. 2010). D'autre part, il est également important de mentionner que l'effet de l'adjuvant superplastifiant est limité dans le temps. Par conséquent, il est essentiel de surmonter ce problème dans le cas de la coulée en place, où le temps de transport du lieu de mélange jusqu'au chantier peut être plus long que le temps d'action superplastifiant (Aitcin. 1998 ; Domone et Illston. 2010). (Domone et Illston. 2010) ont suggéré quelques méthodes pratiques pour faire face à ce défi, par exemple, l'utilisation d'un "retardateur" avec le mélange de béton pour retarder le temps de prise du mélange ou l'ajout de l'adjuvant superplastifiant sur place juste avant le pompage depuis le camion malaxeur.

1.2.3.4. Granulats

Pour obtenir du béton à haute résistance à la compression, il est nécessaire de porter une attention particulière aux propriétés des matériaux utilisés pour sa fabrication. Cependant, les granulats utilisés pour les BHP/UHP doivent être de haute qualité, où la taille, la forme, la texture de surface et la propreté des granulats jouent un rôle essentiel dans l'obtention d'une haute résistance et d'une bonne maniabilité (Kumar et al. 2017). En général, la classification des granulats est basée sur la forme et la taille. La Figure 1.1 illustre les différentes formes de particules de granulats.

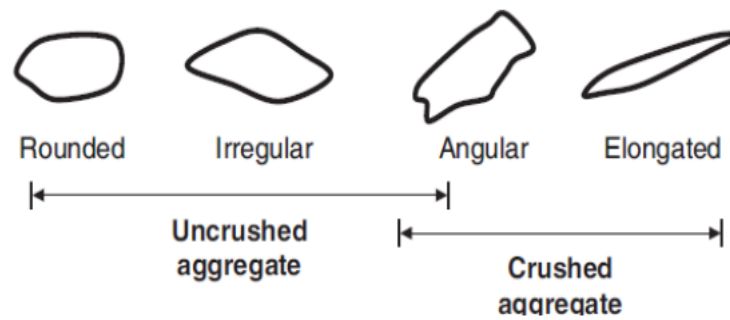


Figure 1.1 : Différentes formes de granulats (Domone & Illston. 2010)

(Aitcin. 1998) a rapporté que la forme aplatie et allongée des granulats réduit la maniabilité tandis que la forme cubique et sphérique offre une meilleure maniabilité. En Europe, la taille principale des granulats peut être décrite par le ratio d/D où d est la plus petite taille nominale et D est la plus grande taille nominale des particules (Domone et Illston 2010). Les catégories suivantes peuvent être identifiées :

0/4 désigne un granulat fin (où 0 fait référence à une taille de particule proche de 0).

4/20 est un granulat grossier.

10/20 est un granulat grossier avec une taille de particule minimale de 10 mm et maximale de 20 mm.

L'utilisation d'un nombre maximal de particules de granulats de plus grande taille entraîne une réduction de la résistance à la compression allant jusqu'à 20% (Domone et Illston. 2010). La "plus faible surface peut expliquer cela avec une zone de transition plus faible" de granulats de plus grande taille, un problème critique dans le mélange de béton avec un faible rapport eau-ciment (Domone et Illston. 2010).

Un autre facteur critique est la résistance intrinsèque des granulats, où les résultats expérimentaux indiquent que la pierre concassée confère une résistance à la compression de 15 à 20 % supérieure à celle des granulats de gravier tout en utilisant les mêmes proportions de matériau cimentaire (Domone et Illston 2010).

Dans le cas du BHP, il y a un transfert de contrainte significatif entre la pâte de ciment hydratée et les granulats en raison du comportement de liaison plus élevé du BHP, ce qui crée des microfissures dans la microstructure du béton. Ainsi, la résistance des granulats est une préoccupation majeure dans les bétons à haute résistance en compression. La pâte de ciment est la connexion la plus faible dans le béton de résistance normale, tandis que le granulat est la connexion la plus robuste (Fagerlund. 1998). À mesure que la résistance à la compression

augmente, les exigences en matière de résistance des granulats augmentent. Dans le cas du BHP, la grande quantité de ciment et la forte densité rendent la pâte de ciment très solide. Ainsi, ce n'est plus la connexion la plus faible dans le béton (La croissance de la résistance dans le BHP fabriqué avec 8 types de granulats est illustrée dans la Figure 1.2).

On peut observer que la pâte de ciment présente une résistance à la compression plus élevée que le BHP, malgré l'utilisation d'un granulat très résistant dans le BHP (Fagerlund, 1998). Les granulats disponibles en Algérie conviennent à la production de BHP avec une résistance à la compression de 90 MPa (Abbas, 2023).

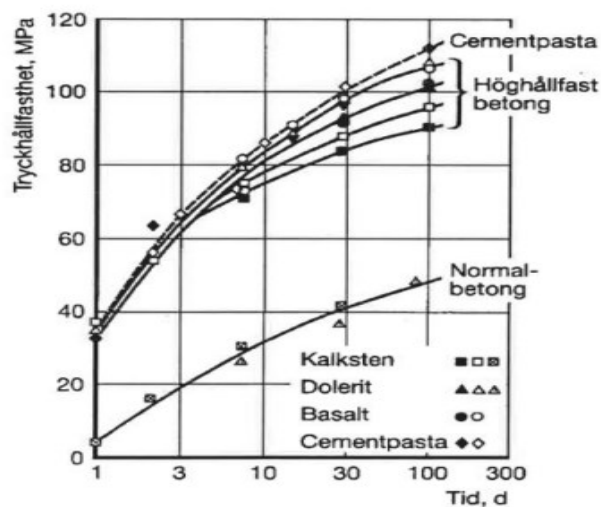


Figure 1.2 : l'évolution de la résistance dans le béton haute performance fabriqué avec différents types de granulats (Fagerlund. 1998).

Certains types de granulats ne conviennent pas à l'utilisation dans le BHP, par exemple le gneiss à grains grossiers et la pierre calcaire à gros grains, tandis que d'autres types de roches à grains fins d'origine éruptive et les calcaires à grains fins sont plus appropriés dans le cas du BHP (Fagerlund. 1998). Le granulat fin présente une résistance plus élevée que le granulat grossier du même type. Ainsi, la valeur maximale recommandée pour la taille des particules de granulat utilisée dans le BHP ne doit pas dépasser 10 à 12 mm (Fagerlund. 1998).

1.2.3.5. Eau de gâchage

L'eau est l'un des composants les plus cruciaux du béton. Elle sert à augmenter la fluidité et la maniabilité lors du mélange, facilitant ainsi la mise en place du matériau. De plus, elle favorise la liaison entre les particules solides présentes dans le matériau lors de la prise. Toutefois, il est important de noter que l'eau peut également entraîner la formation de pores dans la structure du béton, ce qui peut réduire sa durabilité et ses propriétés mécaniques.

L'eau peut se présenter sous différentes formes en fonction de son emplacement dans le béton et de la nature de ses interactions avec les éléments solides. Il existe diverses classifications de l'eau, certaines basées sur des considérations structurelles et d'autres sur des considérations énergétiques. Dans cette classification, nous aborderons les différentes formes d'eau en fonction de la force de leurs liaisons, en les présentant dans un ordre croissant de liaison.

L'eau remplit essentiellement deux fonctions dans le béton : une fonction physique et une fonction chimique. Sur le plan physique, l'eau confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, ce qui permet son écoulement et son moulage. Elle sert également à mouiller les agrégats, favorisant ainsi une bonne liaison avec la pâte de ciment. Cependant, l'eau peut également avoir des effets négatifs. Lorsqu'elle reste en excès dans les pores du béton, elle peut entraîner certains phénomènes tels que le retrait de dessiccation ou même l'éclatement du béton en cas de gel. En général, toutes les eaux potables peuvent être utilisées pour la production de béton. L'eau de mer, bien qu'agressive envers le ciment durci, peut être utilisée pour la fabrication de béton non armé. Cependant, la présence d'agents en suspension tels que des particules d'argile, des micro-organismes, ou des agents en solution dans l'eau peut être fortement agressive et perturber le durcissement du béton. Les substances organiques, en particulier, se révèlent très agressives et peuvent dégrader la pâte de ciment.

1.3. Valorisation des déchets dans le secteur de construction

1.3.1. Introduction

En Algérie, le secteur de la récupération et du recyclage des déchets présente une activité relativement faible, malgré ses avantages potentiels pour l'environnement. Il est également considéré comme une source de richesse et un moteur de création d'emplois, ainsi qu'un moyen de stimuler l'économie nationale. Cependant, l'exploitation de ce secteur reste largement sous-développée. Selon divers rapports de l'Agence Nationale des Déchets (AND) et les statistiques publiées par le ministère algérien de l'Environnement et des Énergies Renouvelables, le taux de réutilisation des déchets en Algérie ne dépasse pas les 10%. Une étude menée par l'AND sur la quantité de déchets ménagers et assimilés à l'échelle nationale sur la période 2019/2021 a révélé une moyenne de 0,68 kg par personne et par jour en 2021, avec une production totale de 11,1 millions de tonnes de déchets la même année. Parmi ces déchets, 30% sont des déchets solides et 50% sont des déchets inertes. Face à cette augmentation constante de la production de déchets et à leur dispersion dans la nature, il est devenu impératif de mettre en place une stratégie de

développement durable pour leur élimination. Selon les déclarations du ministre de l'Environnement, une telle stratégie sera déployée dans le but ambitieux d'éliminer complètement les déchets dans la nature d'ici à 2035 en Algérie. Pour concrétiser cette vision, diverses méthodes peuvent être envisagées, le recyclage des déchets jouant un rôle central parmi elles.

Dans ce contexte, de nombreuses recherches et études se sont penchées sur la réutilisation des déchets dans la fabrication de matériaux de construction. Ces travaux ont exploré la possibilité de remplacer totalement ou partiellement les matériaux naturels tels que le ciment, le sable et le gravier par des matériaux recyclés tels que les déchets plastiques, les briques, le béton, le marbre, le verre, la céramique, etc. L'objectif principal de cette approche est d'améliorer les performances des matériaux de construction, leur durabilité et de contribuer à résoudre les problèmes liés au béton. Ce processus a conduit au développement de nouveaux matériaux appelés "éco-matériaux". Ces éco-matériaux se distinguent par leur respect de l'environnement, leur coût économique et leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques compétitives par rapport aux matériaux traditionnels. Ils peuvent être utilisés dans la construction de nouveaux bâtiments ainsi que dans la rénovation d'ouvrages anciens endommagés.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur la valorisation et la réutilisation des déchets de marbre sous forme d'agrégats et de poudre dans la fabrication d'un béton à hautes performances à base de la fumée de silice et du laitier de haut fourneau broyé.

1.3.2. Différents types de déchets et sous-produits utilisés en génie civil

1.3.2.1. Déchets de marbre en poudre et en sable

Le marbre est l'une des pierres les plus largement utilisées à travers le monde, représentant environ 50 % de la production mondiale de pierres naturelles (Uysal and Sumer. 2011, Kore and Vyas. 2016). Les procédés de fabrication du marbre génèrent généralement entre 20 % et 25 % de déchets de marbre (DM) (Gesoglu et al. 2012, Ashish. 2018), qui sont souvent déversés dans des zones à ciel ouvert à proximité des sites de production. Par exemple, la Chine, premier producteur mondial de marbre, génère environ 350 millions de mètres carrés de marbre chaque année, entraînant la production d'environ un million de tonnes de déchets de marbre à éliminer (Li et al. 2018, Zhang et al. 2020). L'Inde, en tant que deuxième plus grand producteur mondial de marbre, génère environ 6 millions de tonnes de DM annuellement (Mashaly et al. 2016, Vardhan et al. 2016). En Turquie, qui détient environ 40 % des réserves

mondiales de marbre (Gesoglu et al. 2012, Vardhan et al. 2016), environ 511 000 tonnes de DM sont déversées dans des zones de stockage. Des études menées par (Uysal et al. 2012) et (Sadek et al. 2016) ont révélé que l'Égypte, classée cinquième productrice mondiale de marbre, produit plus de 500 000 tonnes de DM chaque année. Selon une étude de (Singh et al. 2017), dans le district de marbre d'Orosei en Italie, entre 5 et 6 millions de tonnes de boues de DM sont rejetées annuellement. (Khodabakhshian et al. 2018) ont estimé que l'Iran produit environ 1 million de tonnes de DM par an. Les États-Unis, le Brésil, l'Espagne, la Belgique, la France, la Suède, le Portugal et la Grèce disposent également de réserves importantes de marbre (Singh et al. 2017). L'accumulation croissante de DM pose de nombreux problèmes pour l'environnement et la santé publique, notamment la diminution de la qualité de l'eau et de la fertilité des sols, la menace pour la biodiversité aquatique, l'obstruction des systèmes de drainage, et la présence de fines particules de DM en suspension dans l'air, pouvant causer des problèmes visuels et de santé respiratoire.

En raison de ses caractéristiques de résistance, de durabilité, de malléabilité, de sa capacité à s'adapter à l'architecture et de son aspect esthétique, le marbre a été un matériau de construction important depuis l'Antiquité. L'industrie du marbre comprend généralement deux principales branches : celle du marbre taillé et celle du marbre concassé et broyé. Le marbre taillé concerne l'extraction de blocs ou de plaques de marbre répondant à des spécifications spécifiques en termes de dimensions et de forme. Les fragments de marbre concassés et broyés peuvent varier en taille, allant de gros blocs à de petits granulés. Ils sont utilisés dans diverses applications, notamment comme agrégats, ballasts, éclats de toiture, charges, pigments, matériaux pour la chaux, et bien d'autres.

1.3.2.2. Fumé de Silice

Les particules de FS sont microscopiques, où environ 95 % d'entre elles ont une taille inférieure à 1 μm , avec un diamètre moyen de 0,2 μm (Ramezani pour. 2014), tandis que la taille des particules de ciment Portland se situe généralement entre 1 μm et 50 μm (Bentz et al. 1999).

Selon (Ramezani pour. 2014), les mélanges de béton contenant de la FS ont montré une résistance plus élevée et une meilleure durabilité que le béton au ciment Portland. (Ramezani pour. 2014) indique également que l'introduction de particules de FS très fines dans le mélange de béton entraîne une résistance légèrement accrue en augmentant l'adhérence du mélange de béton. Cela se traduit par une réduction de la maniabilité du mélange. Ainsi,

l'utilisation d'un adjuvant réducteur d'eau est recommandée pour les mélanges de béton contenant de la fumée de silice.

D'un autre côté, la FS confère au béton frais des propriétés améliorées en réduisant de manière significative la ségrégation et le ressuage (Duggal. 2008). De plus, les particules de FS présentent une grande surface spécifique de 1500 à 2000 cm²/g, réduisant la quantité d'eau libre disponible dans le mélange de béton pour le ressuage, ce qui entraîne une réduction notable de ce phénomène (Duggal. 2008). Étant donné que les particules de fumée de silice sont très fines, elles peuvent obstruer les pores dans le béton frais, entraînant ainsi une réduction significative de ressuage (Duggal. 2008). Cependant, en raison de l'absence de ressuage, il est nécessaire de procéder à une cure adéquate afin de protéger le béton contre le retrait précoce, en particulier lorsqu'il est exposé à un environnement chaud. La cure devrait débuter plus tôt que dans le cas du béton conventionnel (Ramezianpour. 2014).

1.3.2.3. Laitier de haut fourneau broyé

Le LHFB est un sous-produit de la production de fer et se compose de pellets vitreux sphériques de différentes tailles. Il est observé que la taille des particules a des effets différents sur les propriétés du béton (Ramezianpour. 2014). Les particules de moins de 10 µm jouent un rôle dans le développement d'un béton à résistance précoce. Alors que les particules ayant un diamètre de 10 µm à 45 µm contribuent au développement de la résistance après 28 jours, les particules plus grandes que 45 µm ont un effet mineur ou nul sur le béton (Ramezianpour. 2014). Cependant, étant donné que la réaction entre le LHFB et l'eau est lente, l'incorporation de LHFB dans le béton diminuerait la résistance dans le béton jeune, surtout à l'âge de 1 à 6 jours (Ramezianpour. 2014). D'autre part, un développement de résistance similaire au comportement du ciment Portland ordinaire a été observé à l'âge de 7 à 28 jours, avec un développement de résistance légèrement supérieur après 28 jours (Ramezianpour. 2014).

Du point de vue de la durabilité, l'utilisation d'un remplacement partiel du ciment Portland par du LHFB dans un mélange de béton confère au mélange une meilleure durabilité en réduisant le risque d'attaque par les sulfates, les réactions alcali-silice et l'entrée de chlorure (Divsholi et al. 2014). En revanche, il est rapporté que le LHFB accélère le processus de carbonatation dans le béton par rapport au béton au ciment Portland, en particulier avec une plus grande quantité de LHFB (Divsholi et al. 2014, Duggal. 2008, Ramezianpour. 2014). Cela peut s'expliquer par la plus grande quantité de micropores formés dans le béton jeune, entraînant une perméabilité accrue (Ramezianpour. 2014). Les études montrent qu'un

remplacement de 50 % du ciment Portland par du LHFBS donne une profondeur de carbonatation 1,5 fois plus élevée (Ramezaniapour. 2014). Pour réduire la vitesse de carbonatation causée par un remplacement plus élevé de LHFBS, la cure à l'eau devrait être utilisée (Ramezaniapour. 2014).

1.4. Effet des ajouts minéraux et du déchet de marbre sur les propriétés des bétons hydrauliques

1.4. 1. Effet de la fumée de silice et laitier de haut fourneau broyé

Avant 1980, les BHP étaient exclusivement préparés en laboratoire. Cette situation a considérablement évolué dans les années quatre-vingt avec l'introduction des fumées de silice et du laitier de haut fourneau broyé. (Aïtcin. 1983) a mis en évidence d'autres aspects non liés à la résistance et à la durabilité, des propriétés bien connues des BHP, qui soulignent leur utilité future. En effet, les BHP présentent des propriétés recherchées tout en utilisant moins de matériaux, ce qui les rend plus économiques en ressources naturelles que les bétons conventionnels. Cependant, l'incorporation des FS ou LHFBS dans la fabrication des BHP est devenue une alternative indispensable pour améliorer la microstructure, la résistance mécanique et la durabilité de ces bétons.

Au début des années 1980, la FS a été introduite dans la fabrication de bétons en Amérique du Nord (Aïtcin. 1983, Malhotra et al. 1987), ainsi qu'en Europe et dans d'autres régions du monde. L'utilisation de la fumée de silice a démontré la possibilité de produire des bétons avec des résistances à la compression allant de 100 à 150 MPa (Jaugey. 1990, Detwiler. 1991), une performance difficilement réalisable uniquement avec du ciment Portland à l'époque actuelle.

(Esping. 2007) a souligné que l'incorporation de FS en tant qu'addition a un impact sur le retrait endogène, le rendant plus prononcé à un jeune âge. Cependant, la fumée de silice a également réduit la durée de la période plastique du béton.

Le remplacement partiel du ciment par la FS contribue à augmenter la compacité du béton, en particulier dans la zone de transition entre la pâte durcie et les granulats, car elle comble les vides entre les composants granulométriques plus gros du mélange (Aïtcin. 1983). L'incorporation de fumée de silice a deux effets principaux : premièrement, elle réduit significativement la porosité initiale de la pâte de ciment du béton, agissant comme un agent de remplissage ; deuxièmement, elle exerce un effet pouzzolanique résultant de sa réaction avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Aïtcin. 1983)

Les ultrafines, en particulier le LHF, joue un rôle majeur et indispensable dans la composition des BHP. Cette tendance a été confirmée par plusieurs auteurs dans divers pays. (Aitcin. 1983) a conclu que l'utilisation du LHF dans la fabrication des BHR constitue une alternative préférable. En effet, l'introduction d'une certaine quantité de cet additif minéral est moins réactive à très court terme, facilite le maintien des propriétés rhéologiques du béton frais, cela conduit à la diminution de la chaleur d'hydratation, de la porosité et de la maniabilité du BHP. De plus, il contribue à la modification de certaines propriétés du BHP en réponse aux environnements agressifs et aux réactions alcalines.

(Menendez et al .2003) ont trouvé que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme par la réaction pouzzolanique qui raffine les systèmes de pores.

(Srikanth. 2022, Krishma and Thanappan. 2022) ont trouvés que le remplacement du ciment portland ordinaire par 30% du LHF donne une résistance à la compression supérieure à 60% et 70% et produit moins de porosité, moins de perméabilité et moins de sorptivité du béton à haute performance.

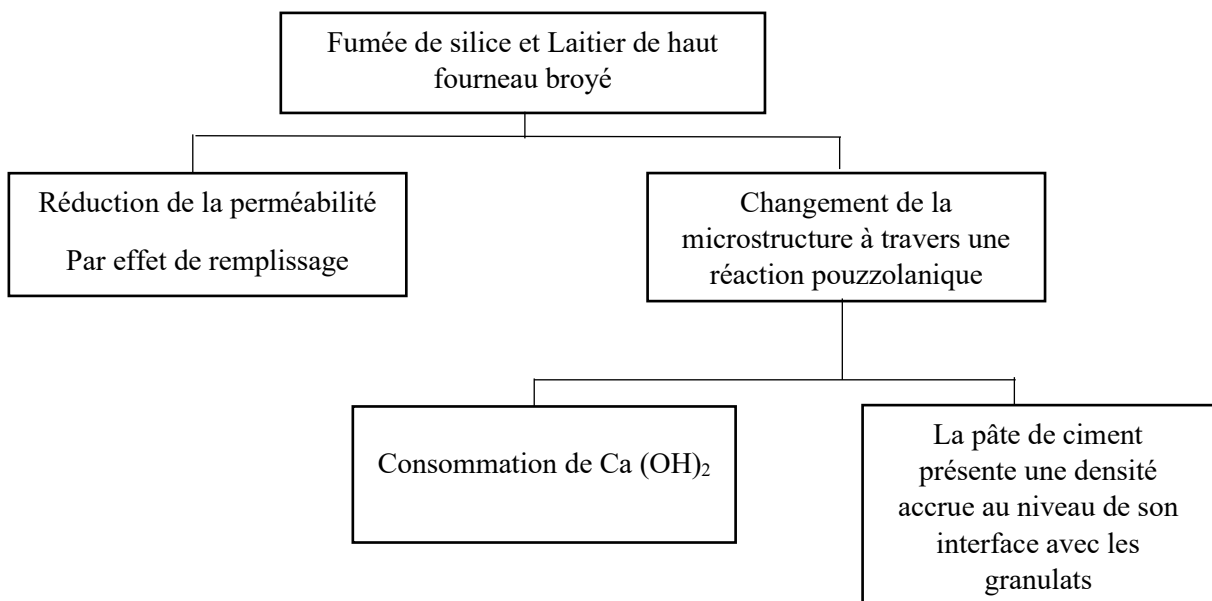


Figure 1.3 : Caractéristiques microstructurales du BHP par rapport de béton (Aitcin. 1983).

1.4. 2. Effet de déchet de marbre

L'incorporation de DM est désormais une technique cruciale pour améliorer diverses propriétés du béton, telles que la fluidité, la résistance et la durabilité. Ces additions minérales ont un impact significatif sur la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, un aspect

étroitement lié au développement de la résistance et à la durabilité des matériaux durcis. Cependant, afin de tirer pleinement parti de ces avantages et de choisir la meilleure approche pour optimiser la formulation, il est impératif de comprendre les caractéristiques de ces nouveaux composants (ajouts minéraux) et leur influence sur les propriétés des bétons (Gagné et al. 1993).

Plusieurs chercheurs ont étudié l'utilisation de DM sous forme de sable et de poudre dans la technologie du béton (Djebien et al. 2015). (André et al. 2014) ont utilisé DM comme granulats grossiers, ils ont expliqué l'amélioration de la maniabilité par la faible absorption. (Corinaldesi et al. 2010) ont ajouté que les DM donnent plus de cohésion pour le béton et le mortier. (Ergun. 2011) a noté que l'incorporation de 5% de DM conduit à améliorer la résistance à la compression de béton de 12%, cette amélioration de la résistance du béton a été observé par d'autres chercheurs (Boughansa et al. 2020, Corinaldesi et al. 2019, Hebhouh et al. 2011, Vardhan et al. 2019). L'amélioration des propriétés mécaniques du béton contenant des DM a été attribuée à la génération de carbo-aluminates en présence de MW qui a une certaine capacité de liaison (Chawla et al. 2018, Ergun. 2011). (Aliabdo et al. 2014) ont montré que l'utilisation de DM améliore considérablement la résistance à la traction du béton. (Vardhan et al. 2019) ont noté qu'en raison de son effet de remplissage, DM est plus approprié comme substitution de granulats fins que d'être utilisé comme substitution de ciment. (Ince et al. 2020) ont utilisé DM comme une substitution partielle du sable dans le béton, ils ont rapporté que l'utilisation de DM améliorent les résistances aux attaques sulfates et au gel-dégel du béton. (Bourzik and Baba. 2022) ont étudié l'utilisation de PM en remplacement partiel du sable dans le béton, les résultats montrent que l'augmentation des rations de PM entraîne une augmentation de la résistance à la compression du béton avec un pourcentage optimal de 15%. Par conséquent, ils ont montré que les mélanges contenant un pourcentage de PM inférieur à 15% ont amélioré les propriétés mécaniques par rapport aux mélanges conventionnels. Ce qui indique que la PM peut remplacer le sable dans le béton, de plus, l'utilisation de la PM est une source viable de matières premières pour l'industrie de la construction ainsi qu'une solution écologique pour l'élimination des PM afin de préserver les réserves de granulats naturels.

(Basaran et al. 2022) ont trouvé que le remplacement des granulats fins et grossiers par des granulats de DM avec des quantités allant jusqu'à 100% en masse pourrait entraîner des effets néfastes sur la résistance à la compression du béton. Il a été constaté que ce remplacement augmentait la résistance à la compression du béton jusqu'à 58%.

L'incorporation de 15 % de poussière de marbre dans la composition du béton densifie sa microstructure, améliorant ainsi sa résistance à la perméabilité et à la sorptivité. Cette pratique contribue de manière significative au développement durable en augmentant la durée de vie des structures en béton, surtout dans des conditions climatiques extrêmes (Singh et al. 2019). (Afzal Basha et Shaikh. 2023) ont observé que l'incorporation de la poudre de marbre réduit progressivement la pénétration des ions chlorure, en diminuant le volume des pores dans le BHP. Cela augmente les propriétés de durabilité et améliore la résistance du béton au gel-dégel.

(Chandramouli. 2022) a noté que le remplacement partiel combiné du ciment par 7,5% de FS et le sable par 15% de PM améliorent considérablement la résistance à la compression et à la traction du béton de 20% et 24% respectivement

(Shinde et al. 2022) ont étudiés la résistance du béton en remplaçant le ciment par LHFB et le sable a été remplacé par la PM avec des proportions appropriées, ils ont trouvé que ce remplacement peut produire du béton durable, plus résistant et économique et qui sera utilisé à la fabrication des pavés et d'autres éléments du béton.

1.5. Conclusion

Cette revue bibliographique a été entreprise dans le but d'examiner de manière approfondie les principales propriétés des BHP. Notre attention s'est également portée sur l'influence des granulats, de la poudre issues de DM, ainsi que des ajouts minéraux tels que la FS et le LHFB sur les caractéristiques des BHP, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux propriétés physico-mécaniques et à la durabilité de ces bétons, en nous appuyant sur des travaux antérieurs qui ont exploré l'utilisation de ces déchets dans les BHP pour atteindre les objectifs définis dans ce chapitre.

Chapitre 2 : Caractéristiques des matériaux et procédures expérimentales

Chapitre 2 : Caractéristiques des matériaux et procédures expérimentales

2.1. Introduction

Dans la possibilité d'accroître la production de matériaux de construction tout en restreignant l'utilisation du ciment et des granulats naturels, les chercheurs s'emploient à identifier d'autres matériaux susceptibles de les remplacer partiellement, favorisant ainsi la production d'un béton durable, résistant et économique.

Ce projet expérimental vise à élaborer un BHP en utilisant des déchets et des sous-produits industriels. Pour cela, dans cette partie, nous présentons les matériaux utilisés ainsi que leurs caractéristiques, les différentes méthodes d'essai employées avec leurs modes opératoires, et les références de leurs normes correspondantes.

2.2. Caractérisation des matériaux utilisés

2.2. 1. Ciment

Dans cette étude, deux types de ciment ont été utilisés pour confectionner des échantillons de BHP à base de PM. Pour les échantillons préparés avec PM, un ciment Portland artificiel CEM I 425 provenant de la cimenterie Sotacib de Kairouan (Tunisie) a été utilisé. Un autre ciment Portland artificiel de type CPA CEM I 52.5, produit par la cimenterie de BISKRA de la société Lafarge groupe SOUAKRI CILAS, a été utilisé pour les mélanges préparées avec SM. Les deux types de ciment sont adaptés à la fabrication de BHP. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques des ciments utilisés sont présentées respectivement dans les tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM I 425

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O ₃	Cl ⁻	MnO
61,35	19,93	5,17	3,27	1,01	2,92	0,21	0,41	0,17	-
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
58,56		13,74		8,23		10,05			

Tableau 2.2 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I-52.5

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O ₃	Cl ⁻	MnO
63,89	18,85	5,16	3,09	1,47	2,69	0,18	0,65	0,03	-
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
65,95		10,48		8,25		8,51			

Les essais physico-mécaniques des deux types du ciment ont été réalisés au laboratoire de développement et de la construction Lafarge service Algérie, les résultats d'identification sont donnés dans le tableau 2.3 et 2.4.

Tableau 2.3 : Propriétés physiques et mécaniques du ciment CEM I 425

Essai	CEM I 425
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1207
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	3135
Finesse SSB (m ² /Kg)	315.7
Temps de début de prise (minute)	77
Temps de fin de prise (minute)	182
Résistance à la compression (N/mm ²)	
2 jours	26,97
7 jours	44,02
28 jours	58,15
Résistance à la flexion (N/mm ²)	
2 jours	5,75
7 jours	8,08
28 jours	8,35

Tableau 2.4 : Propriétés physiques et mécaniques du ciment CPA CEM I-52.5

Essai	CPA CEM I-52.5
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m^3)	1200
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m^3)	3120
Finesse SSB (m^2/Kg)	389.6
Temps de début de prise (minute)	201
Temps de fin de prise (minute)	268
Résistance à la compression (N/mm^2)	
2 jours	30,41
7 jours	45,09
28 jours	56,02
Résistance à la flexion (N/mm^2)	
2 jours	5,13
7 jours	7,44
28 jours	9,11

2.2.2. Granulats

Afin de présenter les principales caractéristiques des granulats utilisés dans la composition de béton à hautes performances, des analyses effectués sur les différents granulats (G1 3/8, G2 8/15, Sable 0/4 et SM 0/3,15) au niveau de laboratoire du Centre Universitaire de Tipaza.

Les sables et les graviers sont les composants principaux du BHP puisqu'ils constituent son squelette. Dans notre cas, il s'agit de deux types de gravier (G1 et G1) prélevés de la carrière de Sétif, un sable concassé provenant de la carrière El GHEDIR et un SM qui substitue le sable de carrière provient de la carrière de Fil-Fila qui se situent à l'Est de la wilaya de Skikda. Les

résultats expérimentaux obtenus sur les granulats utilisés (Figure 2.1) sont présentés ci-dessous dans le tableau 2.3



Figure 2.1 : Granulats utilisés

Tableau 2.5 : Propriétés des granulats

	Sable	SM	G1	G2
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.41	1,66	1.34	1.41
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.63	2.76	2.64	2.67
Equivalent de sable (%)	68.83	67.1	-	-
Module de finesse	3.07	2.12	-	-
Valeur au bleu Méthylène	0.51	0.36	-	-
Micro-Deval (%)	-	-	18,1	17,05
Los Angeles (%)	-	-	28,2	29,1

La figure 2.2 montre la distribution granulométrique des granulats utilisés

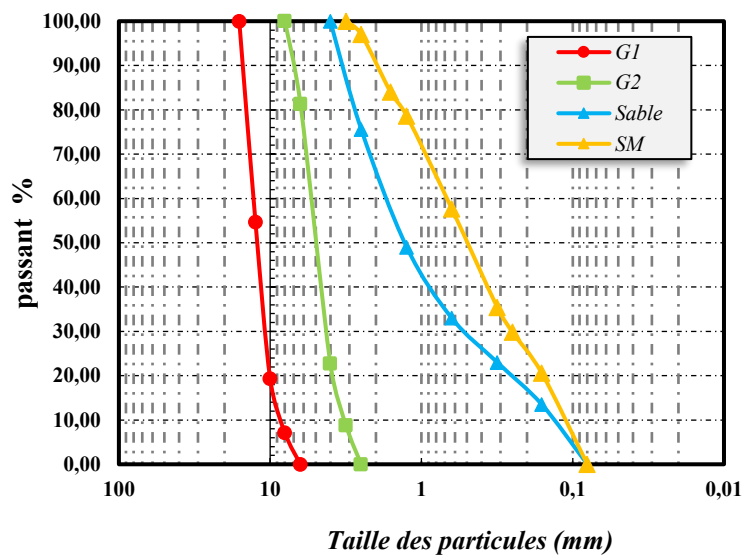


Figure 2.2 : Distribution granulométrique des granulats

2.2.3. Poudres

Des mélanges de BHP ont été formulés à partir des additions minérales en poudre (Figure 2.3) qui sont : PM, FS, LHFB.

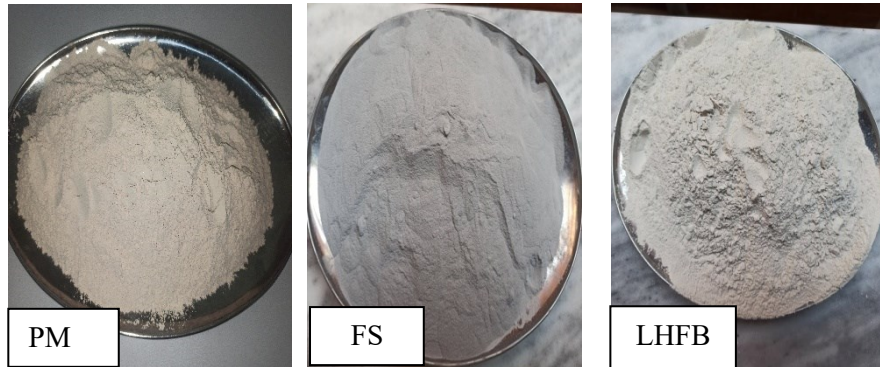


Figure 2.3 : PM et les additions minérales utilisés

La PM est issue de la carrière de marbre Fil-Fila de la région Est de Skikda en Algérie. Ses propriétés physico-mécaniques ainsi sa composition chimique sont indiquées dans le Tableau 2.6 et le Tableau 2.7 respectivement

Tableau 2.6 : Propriétés physico-mécaniques de la PM utilisée

Propriétés	PM
Apparence	Blanc
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.74
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.41
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	9.68
Résistance à l'usure (g/cm ²)	1.85
Résistance au choc (kg/cm ²)	41
La finesse Blaine (m ² /Kg)	285.6
La taille de particules (µm)	<80

Tableau 2.7 : Composition chimique de la PM utilisée

Désignations	PM
CaCO ₃ (%)	96.05
CaO (%)	54.07
Al ₂ O ₃ (%)	0.41
Fe ₂ O ₃ (%)	0.25
SiO ₂ (%)	1.13
MgO (%)	2.85
Na ₂ O (%)	0.17
K ₂ O (%)	0.06
Cl ⁻ (%)	0.03
SO ₃ (%)	0.00

La FS et le LHFB de Granitex ont été utilisés comme additions minérales avec le ciment. Les propriétés des additions utilisées sont détaillées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Propriétés de la FS et du LHFB (SIKA et GRANITEX)

Propriétés	FS	LHFB
Apparence	Gris foncé	Beige clair
Taille de particules (µm)	<1	<80
Densité spécifique	2.25	3.05
Masse volumique (Kg/m ³)	652	933
Surface spécifique (m ² /Kg)	23 002	852
Module de finesse (m ² /Kg)	20 005	803
CaO	1.48	40.13
Al ₂ O ₃	1.04	7.63
Fe ₂ O ₃	1.03	1.45
SiO ₂	97	42.05
MgO	1.06	5.38
Na ₂ O	0.63	0.15
K ₂ O ₃	0.78	0.41
SO ₃	0.12	0.16
Perte au feu	1.78	0.10

2.2.4. Adjuvant

L'adjuvant de 3^{ème} génération Master Glenium Sky 3080", basé sur un éther poly carboxylique, de couleur marron, avec une densité de 1,08 et un PH de 7, a été utilisé en tant que superplastifiant (SP) dans cette étude. Ses caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9 : Caractéristiques physiques d'adjuvant utilisé (BASF)

Densité	1.08
Extrait sec	24 ± 1 %
PH	7.00 ± 1
Couleur	Brun clair
Forme	Liquide
Teneur en ion cl	0.1 %
Teneur en Na ₂ O	≤ 1 %

2.2.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des BHP est celle de robinet.

2.3. Préparation et conditionnement des échantillons de BHP

Il est essentiel de considérer toutes les spécificités des caractéristiques des matériaux, des déchets et des produits industriels qui seront utilisés dans l'élaboration des échantillons de BHP. Il est impératif de définir leurs conditions de conservation avant d'entreprendre les divers essais.

2.3.1. Formulation et composition des BHP

La présente étude examine l'effet de l'incorporation de déchets de marbre en tant qu'agrégat fin sur les propriétés du béton à hautes performances à base de la fumée de silice et du laitier de haut fourneau broyé. Nous avons élaboré plusieurs formulations de BHP dosés à 450 kg/m³, tout en prenant en compte un rapport Eau/Ciment (E/C= 0,40) et un dosage en superplastifiant équivalent à 1% du poids du ciment.

La méthode « Dreux-Gorisse » a été utilisée pour déterminer les quantités de gravier et de sable dans la composition des BHP témoins selon le détail suivant :

$$D_{\max} = 16 \text{ mm} \quad D < 20 \text{ mm} \Rightarrow X = D/2 = 08 \text{ mm.}$$

$$Y = \sqrt{50} - (1,25D) + K + K' + K_p + K_s = \sqrt{50} - (1,25 \times 16) + (10 + 2,52) = 45 \%$$

$$E/C = 180 / 450 = 0,40$$

Compacité = $0,815 - 0,03 = 0,785$ L

V.A du ciment = $450 / 3,12 = 144$ L

Volume de Granulats = $785 \text{ L} - 144 \text{ L} = 641 \text{ L}$.

Tableau 2.10 : Composition de base de BHP témoin par la méthode « Dreux-Gorisse »

Composants	%	V.A total des Masse Sèches	Masse V.A Composants	Composants Kg/m ³
Gravier 8/15 (Carriere SETIF)	33	212	2,67	566
Gravier 3/8 (Carriere SETIF)	18	115	2,64	304
Sable 0/4 (Carriere EL GHEDIR)	49	314	2,62	823
Ciment CPO CEM I-52.5 BISKRA.		144	3,12	450
Adjuvant: Gleninuum Sky 3080 (1%) = 4,5 kg/m³ (4,86 litres)				
Eau			1	180
Volume total de granulats	100 %	641 Litres		2328 kg/m³

Pour chaque type de DM, nous avons confectionnées une série de BHP contenant la FS ou le LHFB, en remplaçant 36 Kg de ciment. Dans la première série, nous avons effectué des substitutions du sable ordinaire par la PM en utilisant : 5%, 10% et 15% de celle-ci, tandis que dans la deuxième série, le sable a été remplacé par 10%, 20%, 30% et 40% de SM.

Les différentes formulations des BHP étudiées sont présentés dans le tableau 2.11

Tableau 2.11 : Désignation des types des BHP testés

N°	Notation	Désignations
BHP TEMOINS	BHP	Béton à Hautes Performances
	BHPFS	Béton à Hautes Performances à base de Fumée de Silice
	BHPLHFB	Béton à Hautes Performances à base de Laitier de Haut Fourneau Broyé
Série 01	BHP+5PM	Béton à Hautes Performances avec 5% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHP+10PM	Béton à Hautes Performances avec 10% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHP+15PM	Béton à Hautes Performances avec 15% de substitution de sable par la poudre de marbre

	BHPFS +5PM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 5% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHPFS +10PM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 10% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHPFS +15PM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 15% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHPLHFB+5PM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 5% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHPLHFB+10PM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 10% de substitution de sable par la poudre de marbre
	BHPLHFB+15PM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 15% de substitution de sable par la poudre de marbre
Série 02	BHP+10SM	Béton à Hautes Performances avec 10% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHP+20SM	Béton à Hautes Performances avec 20% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHP+30SM	Béton à Hautes Performances avec 30% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHP+40SM	Béton à Hautes Performances avec 40% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPFS+10SM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 10% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPFS+20SM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 20% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPFS+30SM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 30% de substitution de sable par le sable de marbre

	BHPFS+40SM	Béton à Hautes Performances à base de fumée de silice avec 30% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPLHFB+10SM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 10% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPLHFB+20SM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 20% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPLHFB+30SM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 30% de substitution de sable par le sable de marbre
	BHPLHFB+40SM	Béton à Hautes Performances à base de laitier de haut fourneau broyé avec 40% de substitution de sable par le sable de marbre

Les différentes compositions des mélanges des BHP étudiées dans la première série sont présentées dans le tableau 2.12.

Tableau 2.12 : Composition des BHP avec la poudre de marbre

	G1 (kg/m ³)	G2 (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	CP (kg/m ³)	SP (L/m ³)	Eau (L/m ³)	PM (kg/m ³)	FS (kg/m ³)	LHFB (kg/m ³)
BHP	565	305	823	450	4,55	180	00	00	00
BHP+5PM	565	305	781,54	450	4,55	180	43,17	00	00
BHP+10PM	565	305	740,08	450	4,55	180	86,34	00	00
BHP+15PM	565	305	698,62	450	4,55	180	129,51	00	00
BHPFS	520,13	303,83	817,83	414	4,55	180	00	36	00
BHPFS+5PM	520,13	303,83	776,96	414	4,55	180	42,90	36	00
BHPFS+10PM	520,13	303,83	736,09	414	4,55	180	85,80	36	00
BHPFS+15PM	520,13	303,83	695,22	414	4,55	180	128,70	36	00
BHPLHFB	520,13	303,83	817,83	414	4,55	180	00	00	36
BHPLHFB+5PM	520,13	303,83	776,96	414	4,55	180	42,90	00	36
BHPLHFB+10PM	520,13	303,83	736,09	414	4,55	180	85,80	00	36
BHPLHFB+15PM	520,23	303,83	695,22	414	4,55	180	128,70	00	36

Et pour les diverses compositions des mélanges des BHP étudiés dans la deuxième série, les résultats de la formulation sont répertoriés dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13 : Composition des BHP avec le sable de marbre

	G1 (kg/m ³)	G2 (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	CP (kg/m ³)	SP (L/m ³)	Eau (L/m ³)	SM (kg/m ³)	FS (kg/m ³)	LHFB (kg/m ³)
BHP	566	304	823	450	4.54	180	00	00	00
BHP+10SM	566	304	740.08	450	4.54	180	86.34	00	00
BHP+20SM	566	304	657.16	450	4.54	180	172.86	00	00
BHP+30SM	566	304	574.24	450	4.54	180	259.51	00	00
BHP+40SM	566	304	491.32	450	4.54	180	345.36	00	00
BHPFS	561.26	302.70	817.83	414	4.54	180	00	36	00
BHPFS+10SM	561.26	302.70	736.09	414	4.54	180	85.80	36	00
BHPFS+20SM	561.26	302.70	654.35	414	4.54	180	171.60	36	00
BHPFS+30SM	561.26	302.70	572.61	414	4.54	180	257.40	36	00
BHPFS+40SM	561.26	302.70	490.87	414	4.54	180	343.20	36	00
BHPLHFB	561.26	302.70	817.83	414	4.54	180	00	00	36
BHPLHFB+10SM	561.26	302.70	736.09	414	4.54	180	85.80	00	36
BHPLHFB+20SM	561.26	302.70	654.35	414	4.54	180	171.60	00	36
BHPLHFB+30SM	561.26	302.70	572.61	414	4.54	180	257.40	00	36
BHPLHFB+40SM	561.26	302.70	490.87	414	4.54	180	343.20	00	36

2.3.2. Fabrication des mélanges

Après avoir préparé les matériaux utilisés, les constituants du BHP ont été introduits dans le malaxeur (Figure 2.4) par ordre décroissant de granulométrie, ce dernier est un malaxeur rotatif à axe horizontal, qui assure une bonne homogénéité à l'ensemble des mélanges des constituants par simple rotation de la cuve.

Le temps de malaxage est de 06 minutes, comprenant 03 minute de malaxage à sec des granulats et de ciment, suivi de 03 minutes de malaxage humide après l'ajout d'eau et d'adjuvant, conformément à la norme **NF P 18-404**.



Figure 2. 4 : Malaxeur de béton à axe horizontal utilisé.

2.3.3. Eprouvettes

Après le malaxage, le mélange est introduit et vibré dans des moules standardisés en acier destinés aux essais programmés conformément à la norme **NF P18-405**, afin d'assurer l'homogénéité du mélange et éliminer les bulles d'air présents dans le BHP, l'arasement se fait par une règle métallique comme illustré dans la figure 2.5.

- Moule prismatique triple pour prismes de béton (70 x 70 x 280) mm³, pour l'essai de flexion.
- Moule cubique (150 x 150 x 150) mm³ pour l'essai de résistance à la compression, l'essai ultrason, l'essai au scléromètre et l'absorption d'eau par immersion et par capillarité aussi.
- Moule cubique (100 x 100 x 100) mm³ pour la perte en masse et la perte de résistance aux attaques chimiques.



Figure 2. 5 : Remplissage des éprouvettes.

2.3.4. Conservation

Après 24 heures de moulage, les échantillons de BHP sont démoulés et conservés dans deux milieux différents : immergés dans l'eau ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$; 100% HR) contenant de la chaux et exposés à l'air libre à l'intérieur du laboratoire ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$; 65%HR). Ceci est réalisé dans le but d'étudier l'effet du milieu de conservation sur les propriétés mécaniques des échantillons (figure 2.6).



(a)

(b)

Figure 2. 6 : Conservation des échantillons de BHP après démoulage

(a) échantillons exposés à l'air libre ; (b) échantillons immergés dans l'eau

- Les échantillons sont conservés dans l'eau et à l'air libre pendant des périodes correspondant aux âges des essais (7, 28 et 90 jours) pour les essais de compression et de traction par flexion.
- Les échantillons destinés à l'essai d'absorption par capillarité sont conservés à l'air libre pendant 28 jours à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Les échantillons destinés à l'essai d'absorption par immersion, sont conservés pendant 14 jours dans une salle humide ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$; 90%HR), puis pendant 28 jours à l'air libre ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$; $60\pm 2\%$ HR).
- Les échantillons destinés à l'essai aux ultrasons et au scléromètre sont conservés dans l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, pendant 28 jours.
- Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les échantillons destinés à l'attaque chimique par les acides sont soumis à deux (02) modes de conservation dans les différentes solutions suivantes :

- 5% d'acide chlorhydrique (HCl),
- 5% d'acide sulfurique (H₂SO₄),

2.4. Modes opératoires des essais

2.4.1. Essais à l'état frais

Pour évaluer le comportement des bétons à hautes performances à l'état frais, nous avons conduit les essais suivants :

2.4.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai est réalisé conformément à la norme **NF EN 12350-2**, qui est l'essai de mesure de fluidité après le gâchage, le plus largement utilisé et reconnu à l'échelle internationale. Le cône utilisé a un diamètre intérieur à la base de 200 mm, un diamètre intérieur au sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm. Placé sur une surface lisse avec sa petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches de volume égal. Chaque couche est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 16 mm de diamètre, ayant une extrémité arrondie. Une fois le cône rempli, sa surface supérieure est nivelée en utilisant la tige avec des mouvements de va-et-vient. Pendant ces opérations, le cône doit rester fixe sur la surface lisse, des écrous de serrage situés à sa base permettent de le maintenir immobile. Après le remplissage, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée affaissement, comme illustré dans la figure 2.7.



Figure 2.7: Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

2.4.1.2. Teneur en air occlus

Nous avons mesuré la quantité d'air occlus dans le BHP en utilisant un aéromètre (Figure 2.8) conformément à la norme **NF EN 12350-7**. L'air occlus résulte du volume d'air piégé à l'intérieur du matériau lors des opérations de malaxage, qui reste emprisonné dans le BHP après sa mise en place (remplissage des moules, vibration). Ce phénomène dépend de la composition des granulats, de la maniabilité du BHP, ainsi que de l'énergie de compactage développée pendant la mise en œuvre (l'énergie de vibration). Pour chaque type de BHP, nous avons mesuré le pourcentage d'air occlus.



Figure 2.8: mesure de la teneur en air occlus à l'aide de l'aéromètre.

2.4.1.3. Densité

La densité réelle du béton frais est évaluée conformément à la norme **NF EN 12350-6**, en pesant une éprouvette de volume connu V et de masse M_e . Ensuite, on remplit cette éprouvette avec le BHP et on mesure la masse totale, notée M_r (Figure 2.9). Enfin, on calcule la masse volumique selon la formule suivante :

$$\rho_{\text{b frais}} = \frac{(M_r - M_e)}{V} \quad (2.1)$$

Avec :

M_r : est la masse du récipient plein de BHP (arasé à l'aide d'une règle).

M_e : est la masse du récipient vide.

ρ est la densité du BHP frais et V le volume de l'éprouvette.



Figure 2.9: mesure de la densité.

2.4.2. Essais à l'état durci

2.4.2.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus couramment mesurée sur le béton durci. Pour évaluer cette propriété, nous avons utilisé des éprouvettes cubiques de dimensions $15 \times 15 \times 15$ cm pour les essais de compression à 7, 28 et 90 jours. Ces essais ont été réalisés conformément à la norme **NF EN 12390-3**, en utilisant une presse automatique d'une capacité de 3000 kN avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s, comme illustré dans la Figure 2.10.

L'éprouvette est positionnée et centrée entre les deux plateaux de la presse, puis chargée progressivement à une vitesse constante jusqu'à la rupture. Les résultats de la résistance en compression correspondent à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes pour chaque âge d'essai.

2.4.2.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion, comme illustré dans la figure 2.10, est évaluée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $7 \times 7 \times 28$ cm. Pour réaliser cet essai, on utilise le dispositif de compression précédent adapté pour l'essai de flexion à 4 points avec une charge de 100 kN, afin de créer les forces de traction dans l'éprouvette conformément à la norme **NF EN 12390-5**.

Pour assurer une répartition uniforme des charges sur l'éprouvette, celle-ci est soigneusement positionnée dans l'appareil. Ensuite, la charge est progressivement appliquée à

une vitesse constante jusqu'à la rupture. Trois échantillons sont testés pour chaque composition afin d'obtenir une moyenne des trois mesures.



Figure 2.10: Dispositif de l'essai de compression et de traction par flexion.

2.4.2.3. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est une méthode non destructive utilisée dans le diagnostic des structures existantes. Cet essai peut être effectué à la fois en position horizontale et verticale sur les quatre faces de l'éprouvette. Il est réalisé conformément à la norme **NF EN 12504-2** (voir figure 2.11) et permet de déterminer l'indice de rebondissement de la surface du béton durci pour les anciens modèles, ou de le lire directement sur un cadran digital pour les modèles récents. Il existe une relation directe entre la dureté superficielle mesurée et la résistance du BHP à la compression.

2.4.2.4. Essais aux ultrasons

Il s'agit d'un essai non destructif pouvant être réalisé aussi bien sur des éprouvettes de laboratoire que sur des ouvrages en béton achevés. L'appareil électronique émet des ondes longitudinales et perpendiculaires dans deux directions à la surface du béton durci, ce qui nous donne le temps de transmission (figure 2.11). Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques à travers le BHP, et par conséquent d'estimer sa résistance, conformément à la norme **NF EN 12504-4**.



Figure 2.11: Essai non destructif au scléromètre et à l'ultrason.

2.5. Essais de durabilité

2.5.1. Absorption d'eau par immersion

L'absorption est généralement mesurée en faisant sécher une éprouvette jusqu'à ce que sa masse reste constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche (Neville. 2000). L'essai d'absorption par immersion a été effectué sur des éprouvettes cubiques (15x15x15 cm) de béton séché à l'étuve jusqu'à ce que leur masse soit constante, puis en les immergeant complètement dans l'eau pendant 24 heures (jusqu'à saturation du matériau) Selon la norme **NBN B 15-215** (figure 2.12). L'objectif de cet essai est de déterminer la porosité du BHP étudié. La formule pour calculer la porosité est la suivante :

$$\text{Porosité} = \frac{Ma - Ms}{\gamma_w \times V} \times 100 (\%) \quad (2.2)$$

Où : - Ma : Masse de l'éprouvette saturée d'eau ;

- Ms : Masse sèche de l'éprouvette ;

- γ_w : Masse volumique de l'eau ;

- V : Volume de l'éprouvette.



Figure 2.12: Essai d'absorption par immersion.

2.5.2. Absorption d'eau par capillarité

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de BHP préconditionnée conformément aux recommandations de la procédure **ASTM C1585-11**. L'essai a été réalisé à 90 jours sur des échantillons de forme cubique de 150 mm. Les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée et régulée jusqu'à ce qu'elles atteignent une masse constante ($\Delta M < 0.1 \%$ en 24 heures). Les faces latérales des éprouvettes ont été recouvertes d'une mince couche de résine pour assurer un écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation

latérale de l'eau absorbée. L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce pré-conditionnement. Il consiste à suivre l'évolution de la masse des éprouvettes plongées de 2 mm dans l'eau (Figure 2.13).

À chaque échéance, les éprouvettes sont retirées du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées, puis replongées dans le récipient. Les échéances de mesure sont les suivantes : 15 minutes, 30 minutes, 60 minutes, 120 minutes, 240 minutes, 360 minutes, 480 minutes, 720 minutes, 1080 minutes et 1440 minutes. Les pesées ont été effectuées à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{Mx - M0}{a.d} \quad (2.3)$$

Où :

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm) ;

Mx : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g),

M0 : masse initiale de l'éprouvette (g),

a : section de l'éprouvette (mm²),

d : densité de l'eau (g/mm³)

Le coefficient de sportivité (s) du béton peut être déterminé de l'expression suivante :

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}} \quad (2.4)$$

Où :

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm²,

Q : volume d'eau absorbé en cm³,

t : temps écoulé en (s),

S : coefficient de sorptivité du spécimen en cm/s^{1/2}.

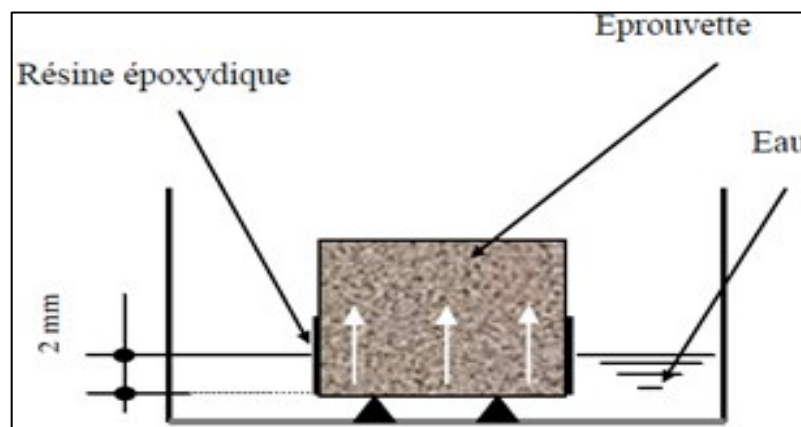


Figure 2.13: Essai d'absorption capillaire.

2.5.3. Essai d'attaque chimique par les acides

Une structure en béton peut être exposée à l'agression de son environnement, ce qui peut varier en termes de degrés d'agressivité. Les milieux d'exposition sont définis en fonction de ces degrés par des normes **ASTMC 267-96** qui spécifient les précautions, les recommandations et les essais nécessaires. Les tests de durabilité face aux attaques chimiques sont réalisés sur des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm. Avant d'être immergés dans les solutions, les échantillons sont préalablement traités dans de l'eau saturée de chaux à une température de 20 ± 2 °C pendant au moins 28 jours. L'utilisation de l'eau saturée de chaux comme milieu de traitement recommandé vise simplement à éviter la dissolution de la portlandite dans l'eau.

Dans la réalité, les agents agressifs susceptibles de compromettre la durabilité du BHP peuvent être de natures diverses, tels que les acides, les sels ou les sulfates. Deux solutions différentes ont été prises en compte dans le cadre de cette étude (Figure 2.14) :

- Acide sulfurique de formule chimique H_2SO_4 (acide le plus nocif),
- Acide chlorhydrique HCl (acide fort).

Nous avons utilisé de l'eau du robinet comme solution de référence. Les attaques chimiques peuvent être d'origine interne lorsqu'elles proviennent de l'un des composants du béton, ou d'origine externe lorsqu'elles pénètrent à l'intérieur du béton à partir du sol, des eaux souterraines, des eaux industrielles ou d'autres sources. Dans notre étude, nous nous concentrons uniquement sur l'étude des attaques chimiques externes.

La concentration des solutions est fixée à 50 g/l conformément à la même norme. Le PH est mesuré immédiatement après la préparation de la solution et doit être maintenu constant tout au long de la période de l'essai en renouvelant la solution chaque mois.

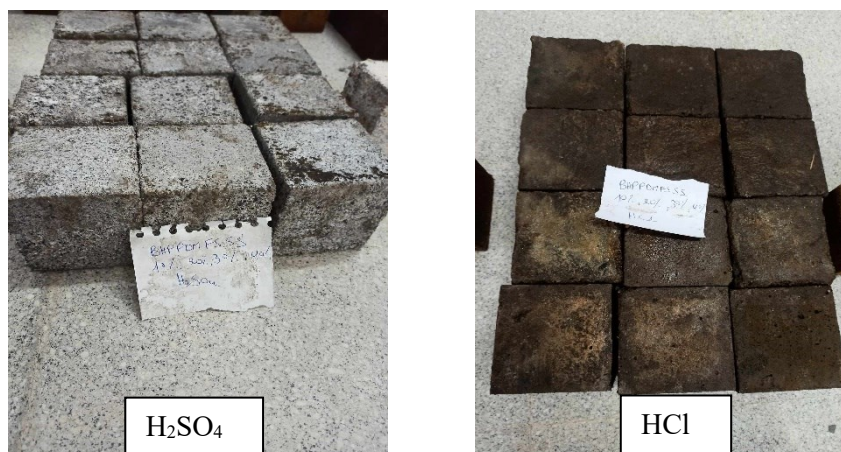


Figure 2.14: Etat des éprouvettes des BHP immergées dans les différentes solutions.

Avant d'introduire la nouvelle solution, le bac de conservation est rincé à l'eau. Les bacs de conservation sont ensuite couverts et conservés à une température de 20 ± 2 °C pour éviter toute évaporation. Les mesures des résistances à la compression sont effectuées après 56, 90 et 180 jours d'attaque. Pour le calcul des variations de poids, les échantillons sont pesés à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g, aux mêmes échéances suivantes.

2.6. Conclusion

Dans cette section, nous résumons le programme expérimental réalisé ainsi que les variables étudiées. Ce travail s'est déroulé en plusieurs étapes :

- La caractérisation des différents matériaux utilisés durant la démarche expérimentale.
- Formulations des BHP, BHP à la base de la FS et des BHP à la base de LHFB, avec substitution partielle du sable par des DM sous forme de poudre et de sable.
- Essais des BHP à l'état frais (ouvrabilité, densité et air occlus).
- Essais des BHP à l'état durci (essais de compression, traction par flexion et essais non destructifs).
- Essais de durabilité (absorption d'eau par immersion et par capillarité, attaques chimiques par les acides H₂SO₄ et HCl).

La Figure 2.14 récapitule les étapes et les essais réalisés dans cette étude.

Les résultats des essais effectués et les interprétations des résultats seront présentés dans les chapitres suivants.

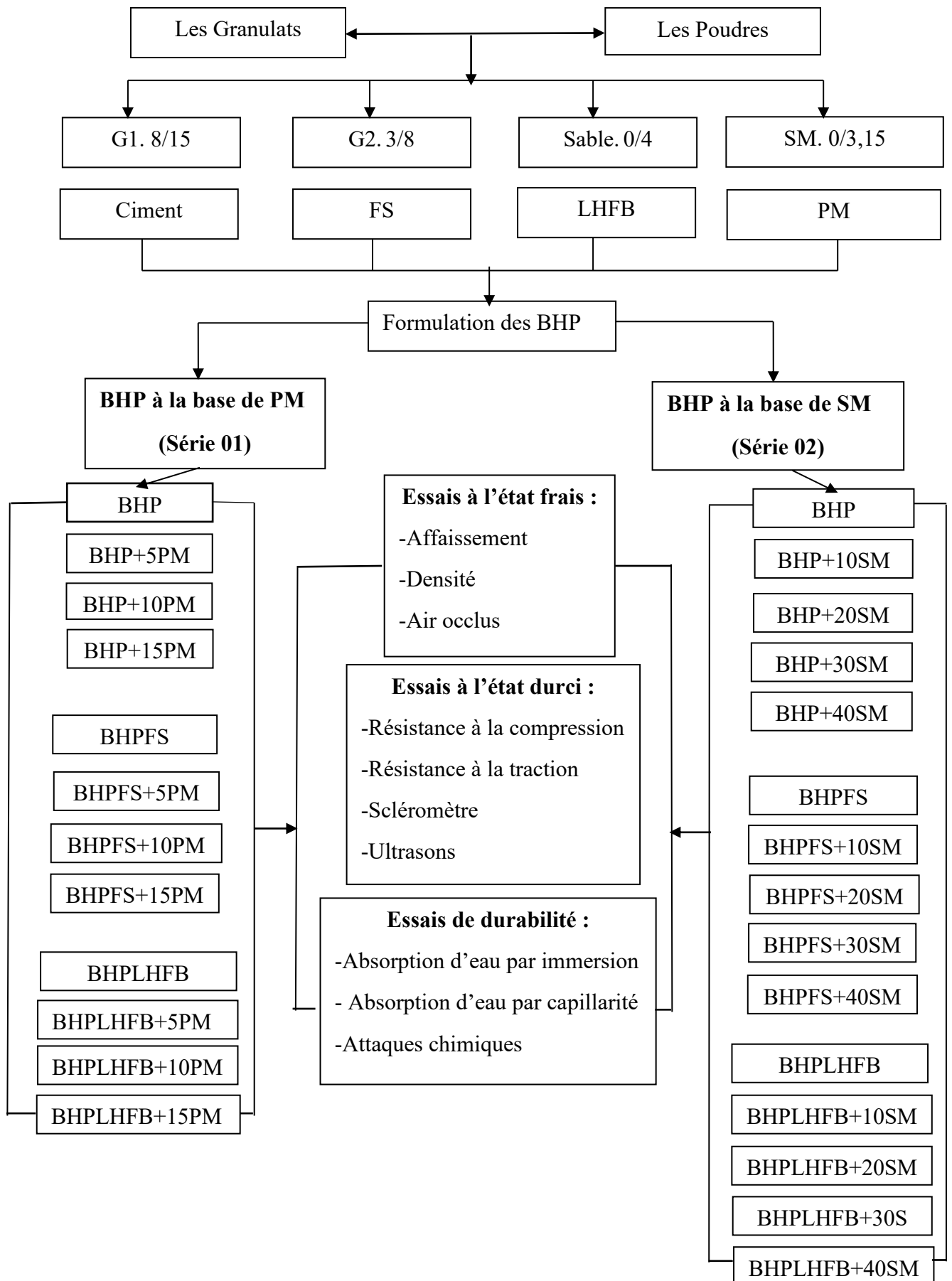


Figure 2.15: Organigramme de la démarche expérimentale.

Chapitre 3 :
Etude du comportement
Physico-mécanique des BHP

Chapitre 3 : Etude du comportement physico-mécanique des BHP

3.1. Introduction

Les résultats expérimentaux portant sur les caractéristiques physico-mécaniques des divers mélanges de BHP étudiés sont présentés et analysés dans ce chapitre. Ils englobent les résultats à l'état frais, tels que la maniabilité évaluée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, la densité, la teneur en air occlus, ainsi que les propriétés à l'état durci, notamment l'évolution de la résistance mécanique en compression et en flexion dans le temps, ainsi que le module d'élasticité dynamique. Deux séries d'essais ont été menées sur les différentes formulations de BHP décrites en détail dans le chapitre précédent, dans le but d'étudier l'impact des DM combinés avec la FS, et le LHFB sur le comportement physico-mécanique des BHP.

3.2. Effet de l'introduction de PM sur les propriétés du BHP

3.2.1 Ouvrabilité :

La Figure 3.1 met en évidence les variations d'affaissement des mélanges de BHP. On constate une augmentation de 2,38 % de la maniabilité lorsque le LHFB est présent dans le BHP, tandis qu'une diminution de 24,39 % est observée pour le BHP contenant de la FS. Ces résultats corroborent plusieurs études où une substitution partielle du ciment par du LHFB ou de la FS a été effectuée (Boukendakdji et al. 2012 ; Wong et Razak. 2005) respectivement. Le LHFB avec sa finesse blaine comble les espaces vides entre les grains de ciment, réduisant ainsi les forces de frottement du composite CPO-LHFB et améliorant sa fluidité. En revanche, la FS, avec sa micro-silice a une surface spécifique élevée, nécessite une quantité d'eau plus importante pour être humidifiée. Le remplacement de 15 % du sable par PM conduit à une augmentation maximale de la maniabilité de 7,31 %, 19,35 % et 7,14 % respectivement pour les mélanges de BHP contenant du CPO, de la FS et du LHFB. Cette amélioration peut être expliquée par la présence d'éléments fins ayant une surface lisse et une absorption moindre par rapport aux granulats grossiers, ainsi que par la facilitation de la dispersion des grains de pâte de ciment par la PM et le superplastifiant (Djebien et al. 2018).

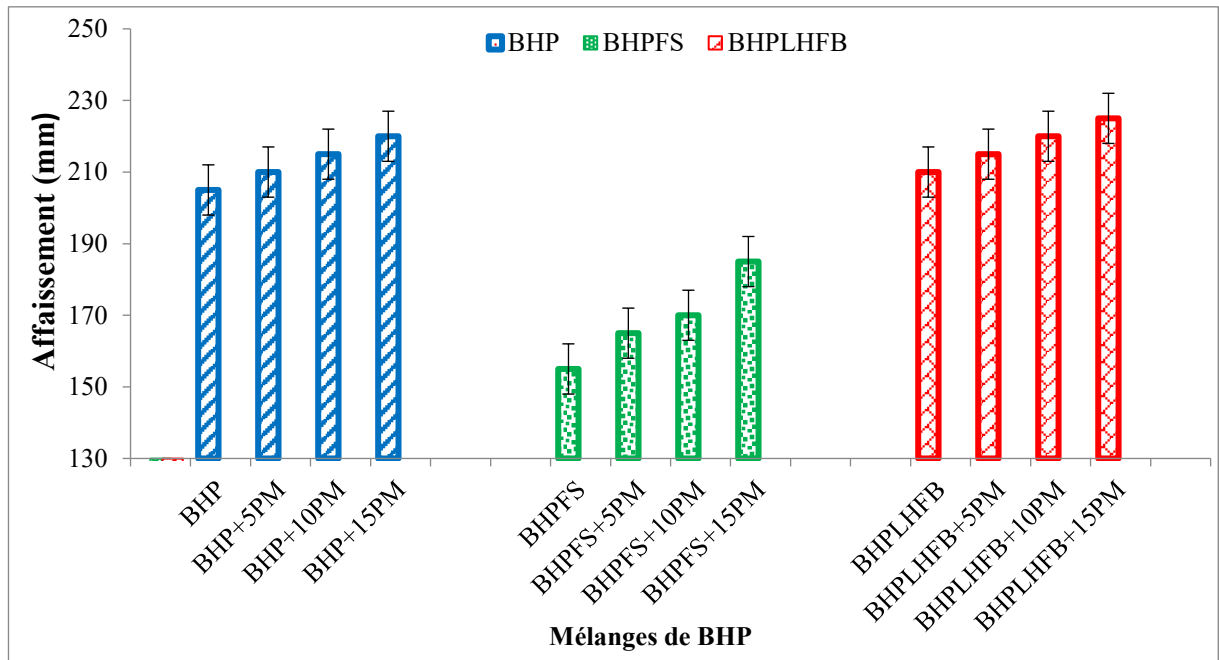


Figure 3.1 : Maniabilité des mélanges de BHP

3.2.2. Densité :

Les résultats des tests de densité des différents mélanges de BHP sont présentés dans la Figure 3.2

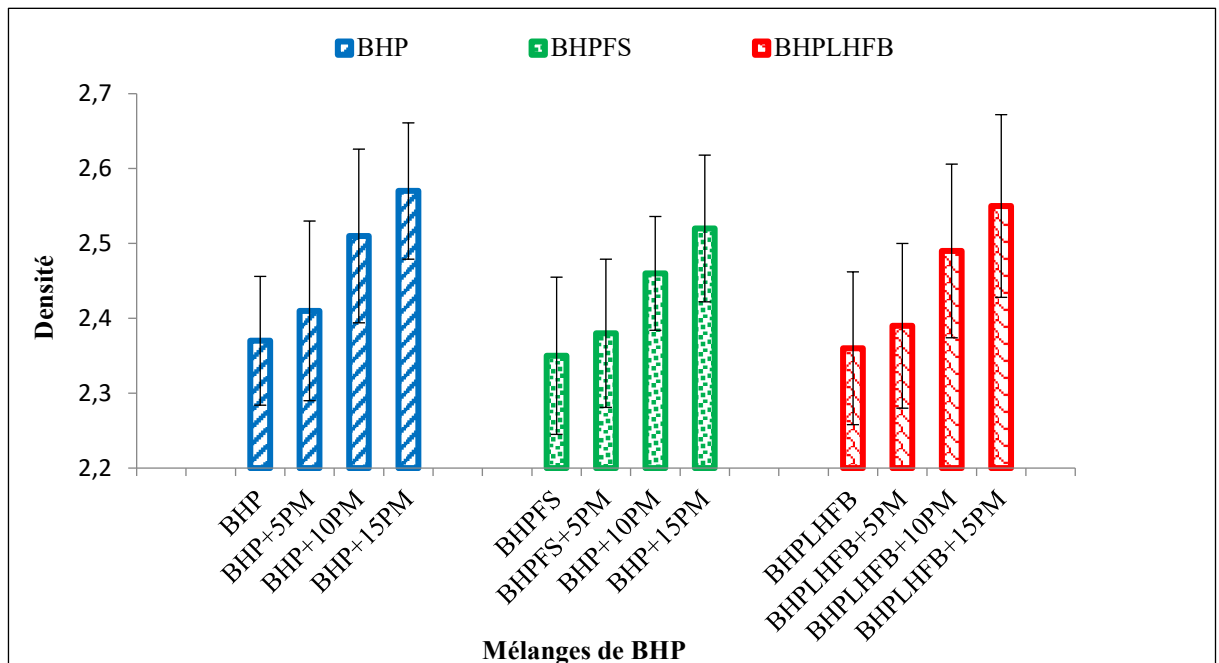


Figure 3.2 : Valeurs de densité des mélanges de BHP

La figure 3.2 montre que le remplacement partiel du ciment par LHFB et FS dans les mélanges de BHP entraîne une réduction de 0,84% et 0,42% respectivement de la densité, attribuable à la densité plus élevée du ciment.

Cependant, l'augmentation du taux de substitution de sable par la PM entraîne une élévation de la densité, atteignant jusqu'à 7,23 % pour le BHPFS, 8,05 % pour le BHPLHFB, et 8,44 % pour le BHP. Ce phénomène est attribué à la densité plus élevée de la PM par rapport aux autres granulats.

3.2.3. Teneur en air occlus :

Comme présenté dans la Figure 3.3, on observe une diminution respective de 6,45 % et de 9,68 % de la teneur en air pour le BHPLHFB et le BHPFS par rapport au BHP sans ajouts. Cette tendance a été notée respectivement par (Lee et Lee. 2020), et elle a été attribuée à la densité élevée du ciment par rapport autres ajouts et que la finesse du LHFB et FS est importante par rapport au ciment . On peut remarquer aussi qu'il y a une réduction de 58,06, 68,69 et 75 % de la teneur en air est constatée pour le BHP, BHPLHFB et BHPSF, respectivement, lors de l'utilisation de 15 % de PM. Ce phénomène peut s'expliquer par la diminution du module de finesse à chaque substitution du sable par la PM, ainsi que par la présence d'éléments fins qui comblent les vides et réduisent la formation de pores d'air dans le BHP.

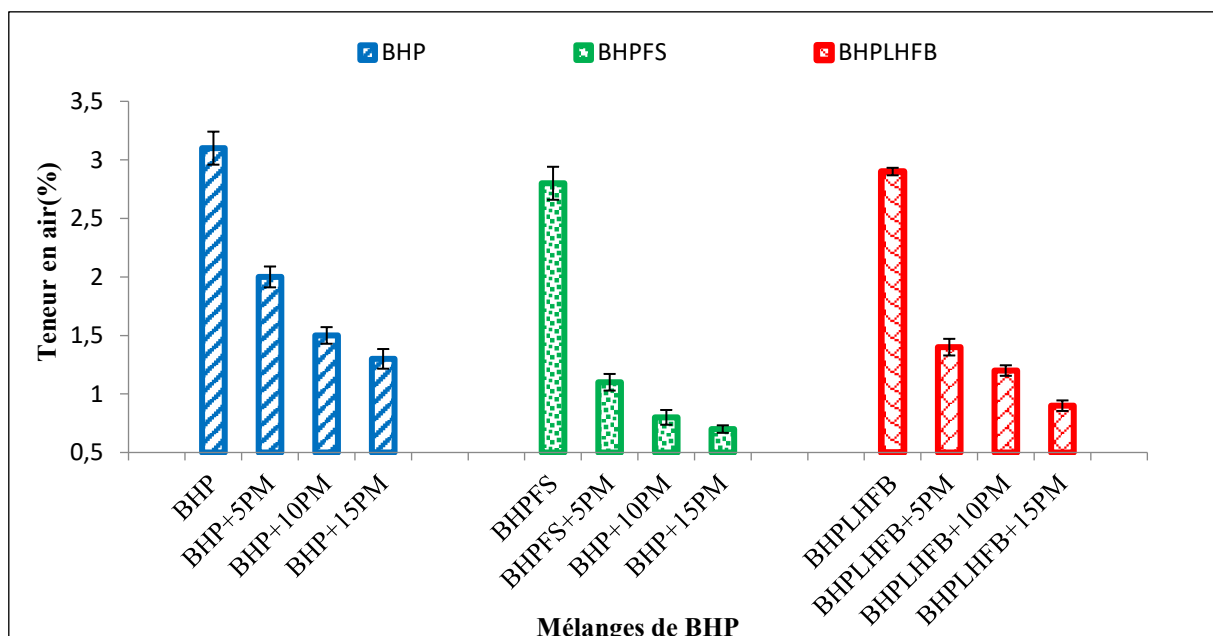


Figure 3.3 : Valeurs de la teneur en air occlus des mélanges de BHP

3.2.4. Résistance à la compression :

La Figure 3.4 indique l'effet du taux de substitution sur la résistance à la compression des mélanges de BHP. Le remplacement du ciment par 8 % de FS dans le BHP augmente légèrement la résistance à la compression aux âges précoces et tardifs. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par (Chandramouli. 2022), en raison du rôle de remplissage des particules très fines de FS (Behnood et Ziari. 2008). Une augmentation de 25,32 à 26,36 % est observée dans la résistance à la compression pour le BHP contenant du LHFB entre 7 et 90 jours.

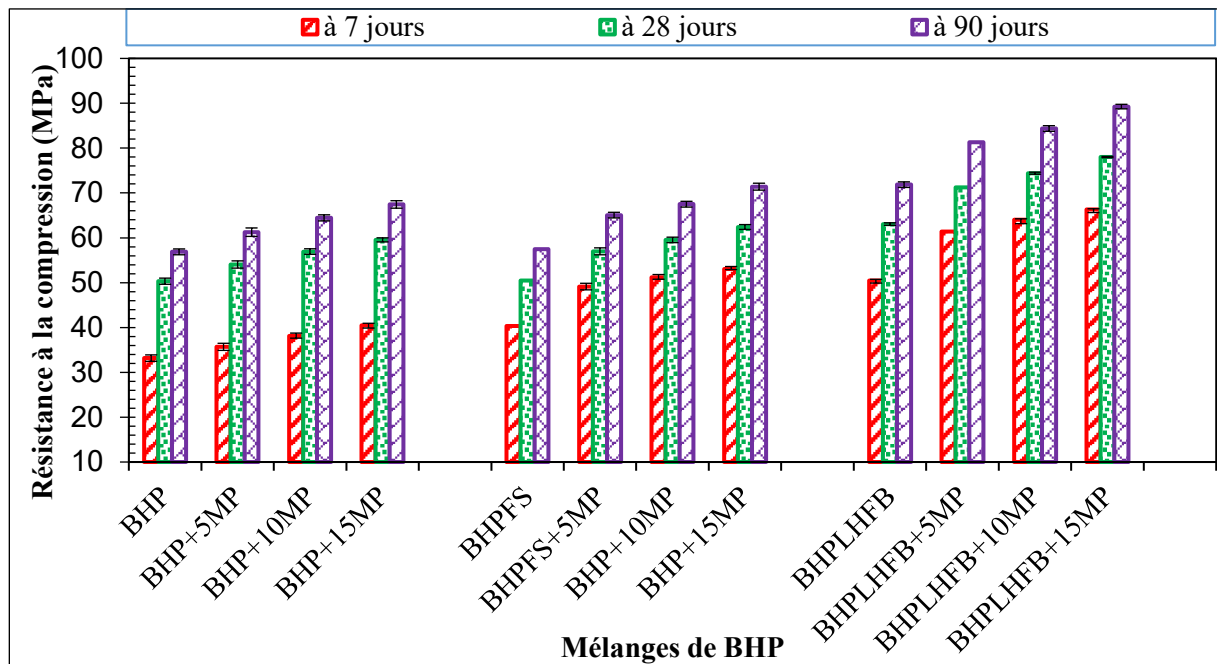


Figure 3.4 : Valeurs de la résistance mécanique des mélanges de BHP

L'incorporation de 15% de PM dans le BHP sans ajouts entraîne une augmentation substantielle de 21,96 % de la résistance à la compression à 7 jours. Cette amélioration peut être attribuée à la présence de CaO dans la PM, qui confère une haute résistance initiale (Djebien et al. 2018). À 28 et 90 jours, une augmentation remarquable de 18,30 % et 18,60 % de la résistance à la compression, respectivement, est observée, principalement due à la teneur élevée en C₂S, reconnue pour sa contribution à la résistance à long terme grâce à la densification de la matrice et à l'empilement, en accord avec les résultats de Farinha et al. (2015).

Pour le BHP combiné avec FS, une augmentation significative de 25,61 %, 19,60 % et 20,52 % est observée à 7, 28 et 90 jours, respectivement, lors de l'ajout de 15% de PM. Cela peut être attribué à la présence abondante de C₂S, résultant de la réaction chimique entre le CaO dans la PM et le SiO₂ dans la FS. Dans le cas du BHPLHFB, une augmentation notable de 31,47 %, 23,71 % et 24,23 % à 7, 28 et 90 jours, respectivement, est constatée lorsque 15 % de PM

est utilisé. Ce phénomène peut être attribué à la teneur élevée en CaO dans le mélange de BHP. Cette teneur élevée en CaO améliore la cohésion et assure une forte adhérence des granulats aussi bien dans les premiers stades que dans les stades ultérieurs du développement du béton. De plus, l'impact positif du remplissage des vides dû à la présence de PM est observé (Ulubeyli et Artir. 2016).

La valeur maximale de la résistance à la compression a été atteinte avec le BHPLHFB, formulé avec 15% de PM sur différentes périodes de maturation. Cette observation souligne l'influence favorable résultant de l'incorporation simultanée de LHFB et de PM sur les performances mécaniques du béton.

La Figure 3.5 met en évidence le taux de variation de la résistance des BHP dans l'eau par rapport à celle des BHP curés à l'air libre à l'âge de 28 jours. Il est observé que la cure par immersion dans l'eau est bénéfique pour la résistance à la compression des BHP testés. De plus, le remplacement de 15 % du sable par la PM conduit à une augmentation de la résistance de l'ordre de 10,44, 7,27 et 5,58 % pour les mélanges curés de BHP, BHPFS et BHPLHFB respectivement, par rapport à ceux préservés à l'air libre.

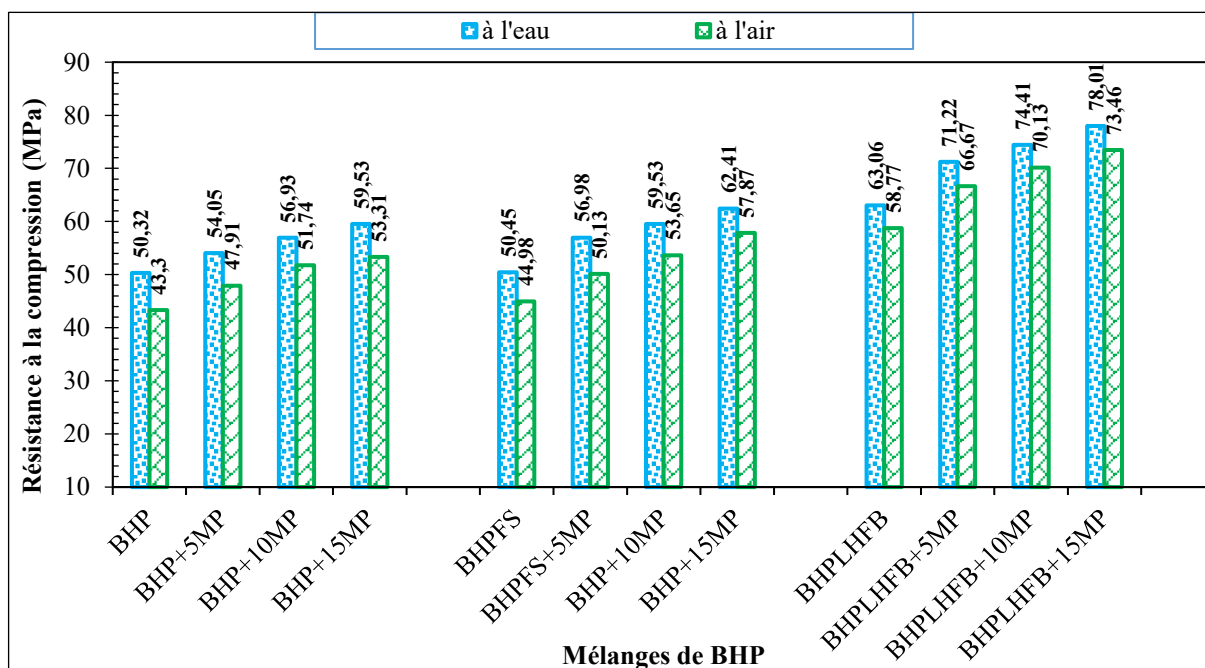


Figure 3.5 : Influence du mode de cure sur la résistance mécanique à 28 jours des mélanges de BHP

La diminution de la résistance à la compression dans le cas des BHP curés à l'air libre est attribuable à la dessiccation, qui résulte de l'évaporation de l'eau à l'air libre. Cette dessiccation

conduit à un ralentissement de la cinétique d'hydratation et engendre des déformations qui compromettent la résistance mécanique des BHP (Aitcin et al. 1996).

3.2.5. Résistance à la flexion :

Les résultats des tests de résistance à la flexion des mélanges de BHP sont présentés dans la Figure 3.6. Globalement, le comportement de la résistance à la flexion est similaire à celui de la résistance à la compression. On observe une amélioration de la résistance à la flexion avec l'augmentation de la teneur en PM pour tous les mélanges de BHP. Des augmentations de 14,40 % et de 17,17 % de la résistance à la flexion sont observées à 90 jours pour les mélanges BHPFS et BHPLHFB respectivement contenant 15 % de PM. Cette amélioration peut s'expliquer par la capacité de remplissage du PM (Vardhan. 2019), la formation de (C-S-H) lors de l'hydratation du ciment avec la FS (Chandramouli. 2022) et la modification de la structure des pores dans le BHP durci en présence du LHFB (Ozbay et al. 2016).

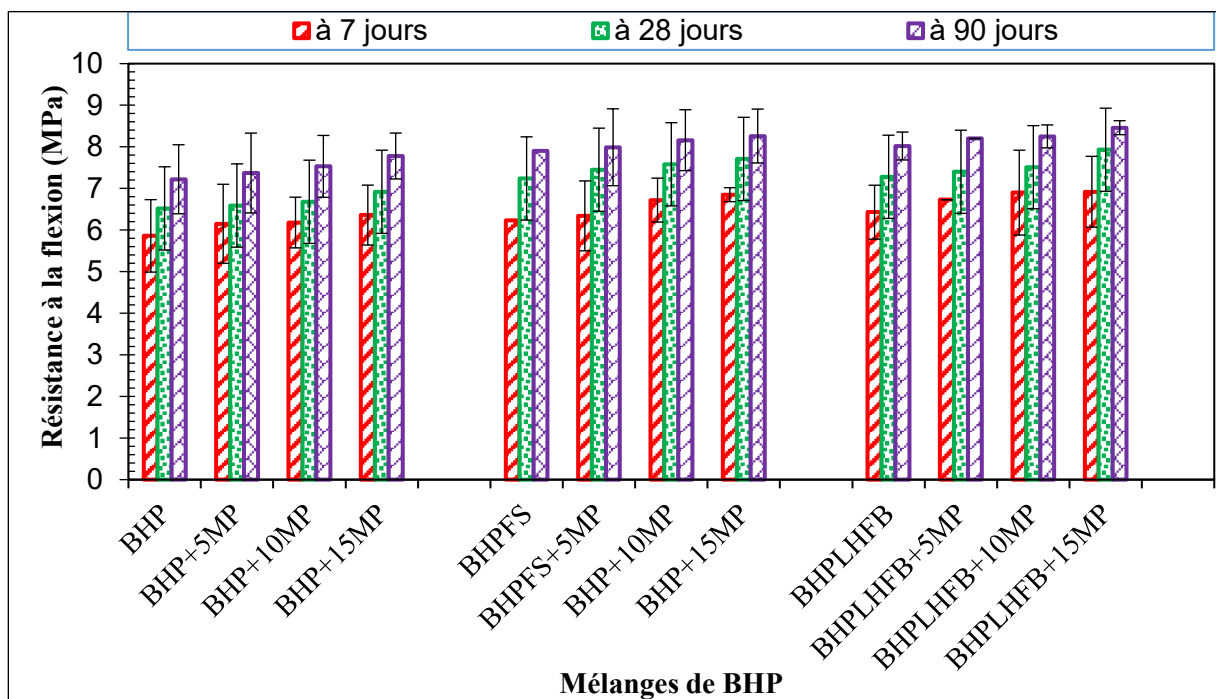


Figure 3.6 : Valeurs de la résistance à la flexion des mélanges de BHP

La Figure 3.7 présente les variations de la résistance à la flexion des BHP soumis à un processus de cure par rapport à ceux qui ne sont pas curés, à l'âge de 28 jours. De manière similaire à ce qui est observé pour la résistance à la compression, l'immersion dans l'eau pour le processus de cure semble bénéfique pour améliorer la résistance à la flexion de tous les mélanges de BHP testés. La diminution de la résistance à la traction demeure liée au phénomène de dessiccation, résultant de l'évaporation de l'eau à l'air libre.

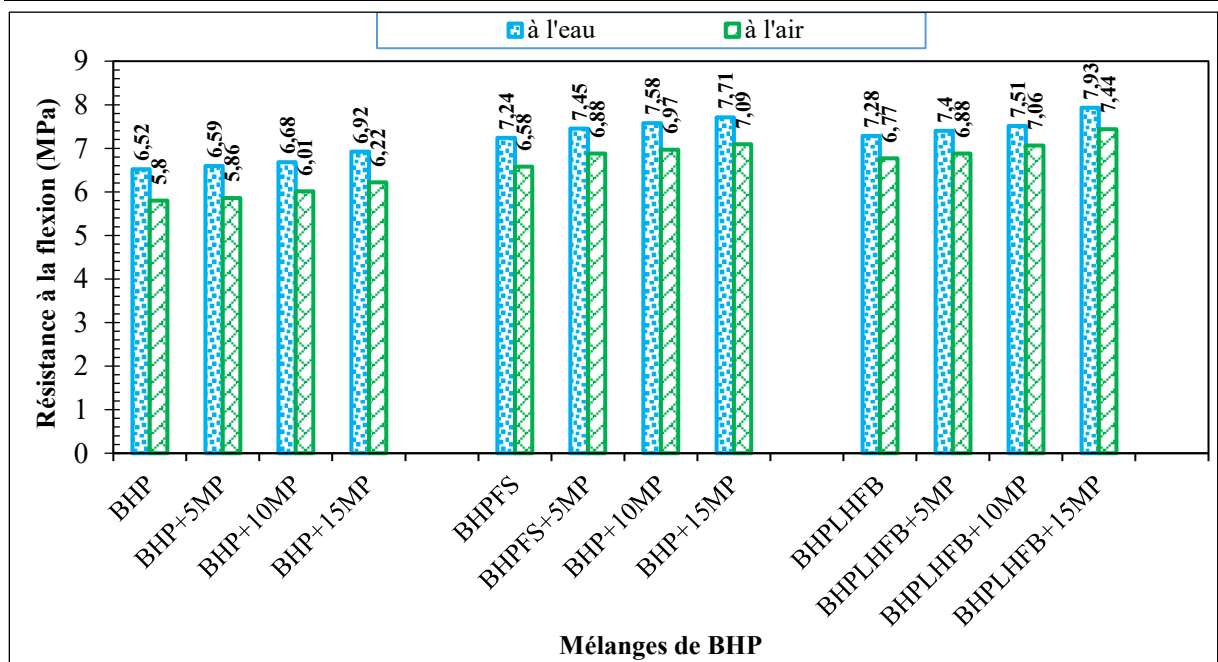
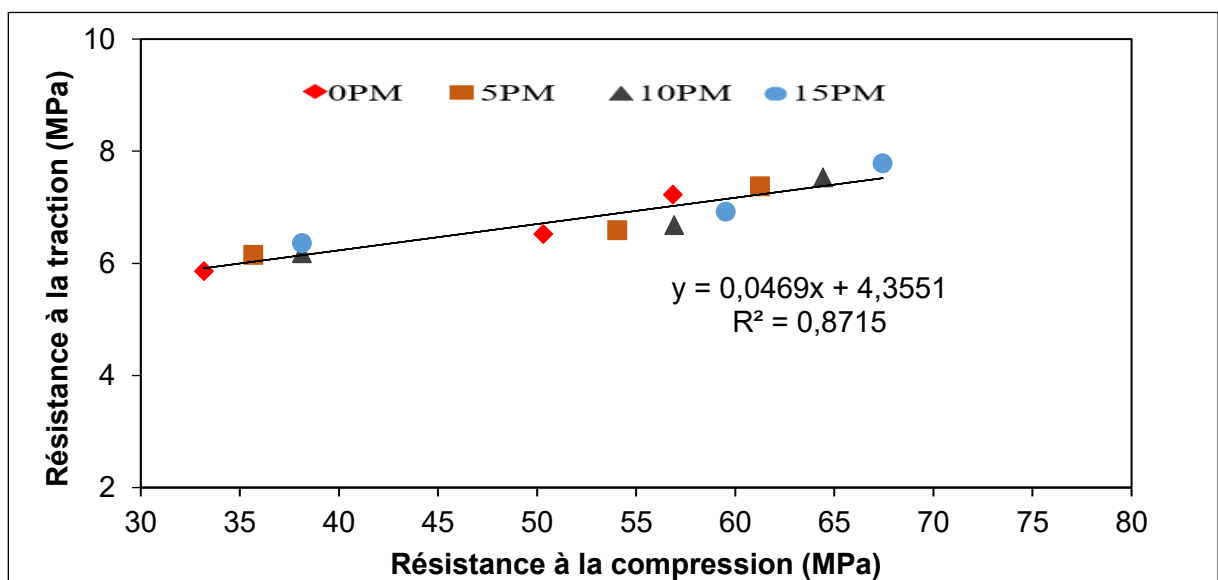
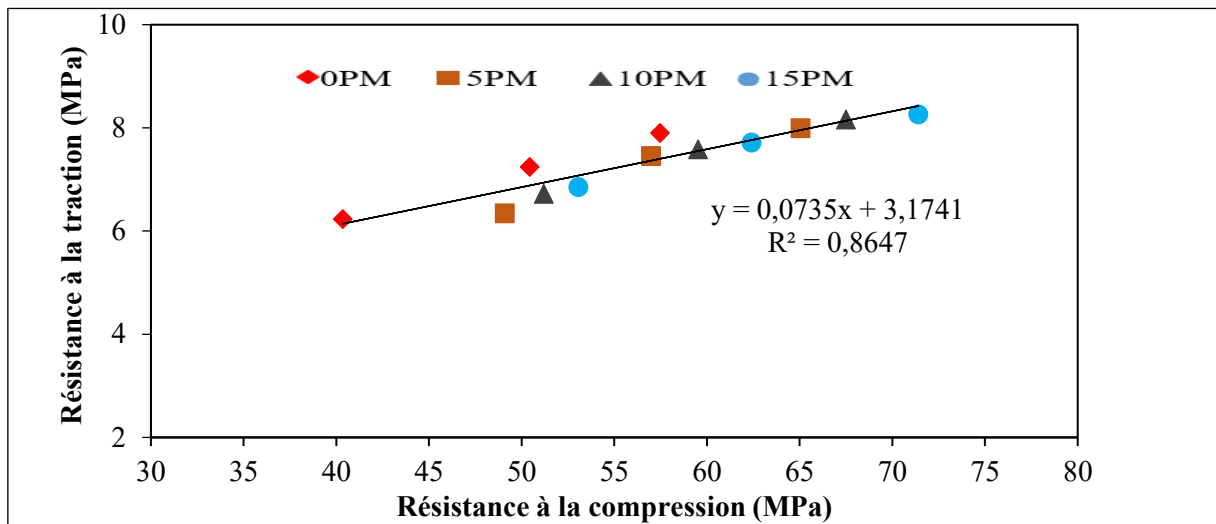


Figure 3.7 : Influence du mode de cure sur la résistance à la traction à 28 jours des mélanges de BHP

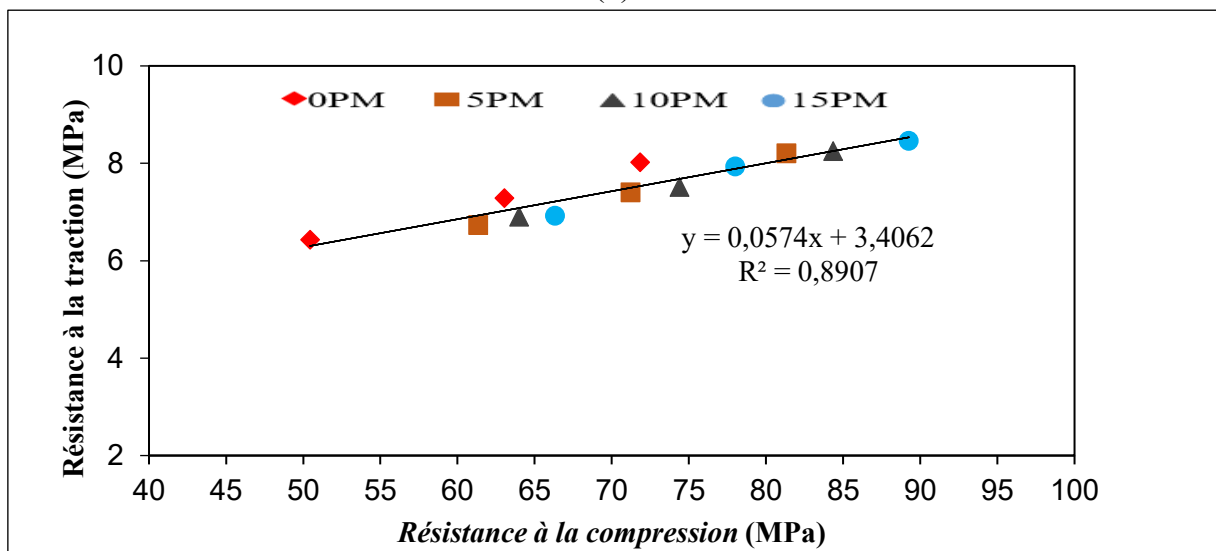
La figure 3.8 illustre la relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression pour tous les mélanges de BHP à différents stades de durcissement. Comme le montre le graphique, une relation linéaire est observée entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression, avec des coefficients de corrélation élevés, R^2 , respectivement égaux à 0,87 ; 0,86 et 0,89 pour les mélanges BHP+PM%, BHPFS+PM% et BHPLHFB+PM%.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.8 : Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression aux différents âges pour : (a) BHP+PM% ; (b) BHPFS+PM% ; (c) BHPLHFB+PM%

3.2.6. Vitesse des impulsions ultrasoniques (VIU) :

Les résultats des tests de détermination de la vitesse des ultrasons sont présentés graphiquement dans la Figure 3.7 pour tous les mélanges de BHP à différents âges. Les résultats démontrent une excellente qualité des différents mélanges de BHP, car leurs vitesses d'impulsion dépassent les 4575 m/s, seuil défini comme indicateur de qualité (Solis-Carcano et Moreno. 2008). Une légère augmentation de la vitesse d'impulsion est observée pour les mélanges BHPSF et BHPLHFB. Cette observation peut être attribuée à une adhérence robuste entre la fumée de silice et la pâte de ciment, ainsi qu'entre le laitier de haut fourneau broyé et la pâte de ciment, réduisant ainsi la taille des pores dans le béton.

La vitesse des ultrasons augmente avec l'augmentation de la teneur en PM dans tous les mélanges de BHP et à différents âges. À 7 jours, lorsque la teneur en PM passe de 0 à 15 %, les vitesses des impulsions varient de 4983 à 5223 m/s pour le BHP+PM%, de 4990 m/s à 5289 m/s pour le BHPSF+PM%, et de 5235 m/s à 5396 m/s pour le BHPLHFB+PM%, signifiant des augmentations respectives de 4,82 %, 5,99 % et 3,07 %. Ce phénomène est attribué à la densité élevée du PM et au fait que la PM occupe les vides dans le BHP, réduisant ainsi sa porosité (Boughamsa et al. 2020). À 28 et 90 jours, la vitesse des impulsions pour tous les mélanges de BHP à base de PM continue d'augmenter progressivement, bien qu'à un rythme plus lent par rapport aux premiers âges, comme illustré dans la Figure 3.7.

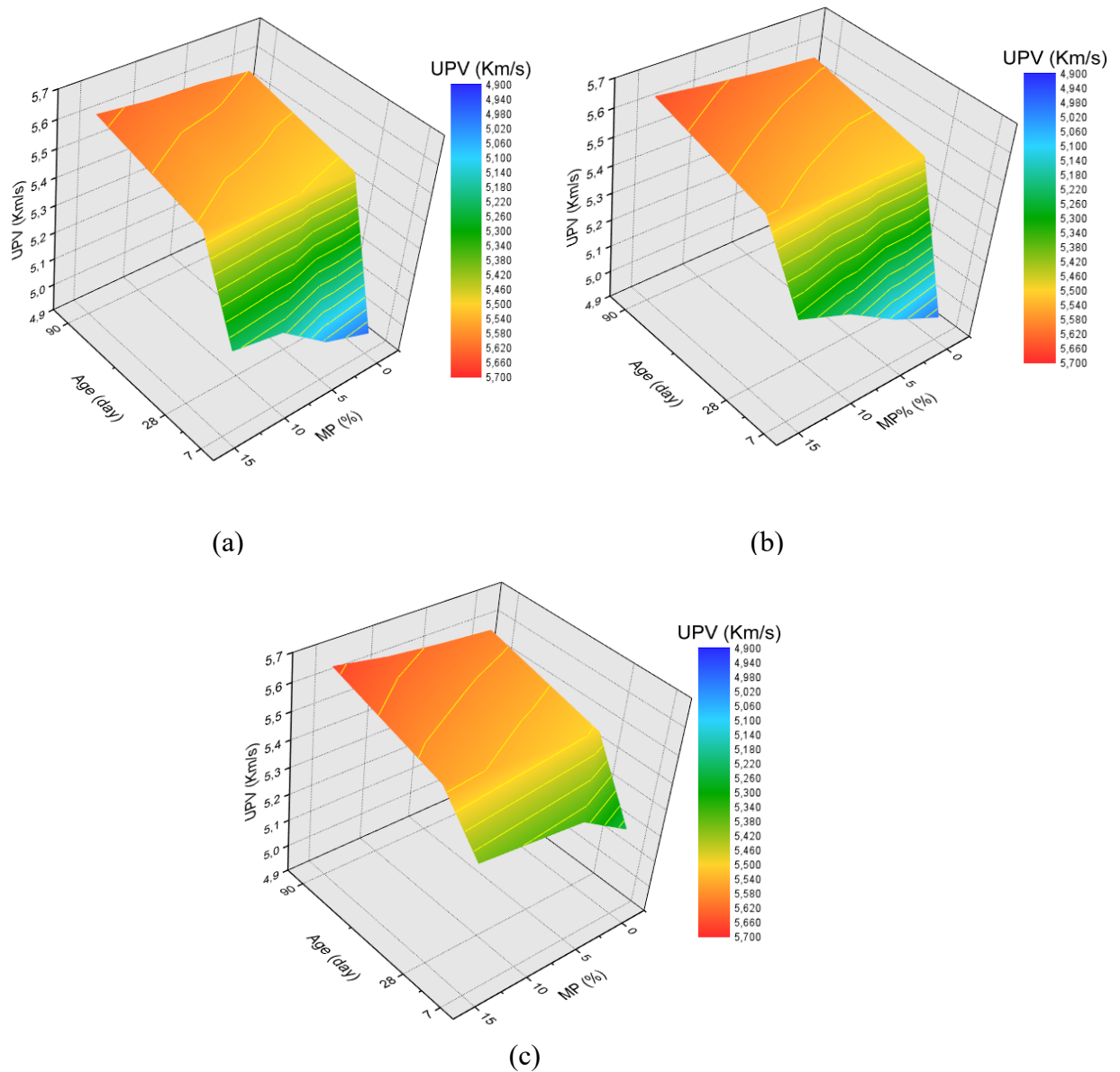
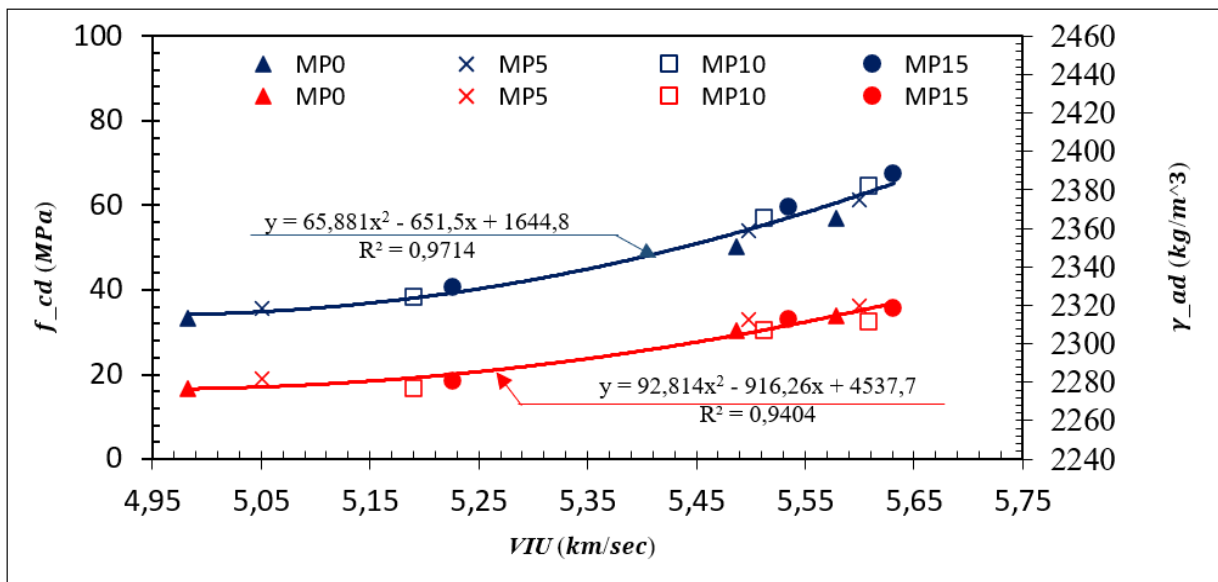


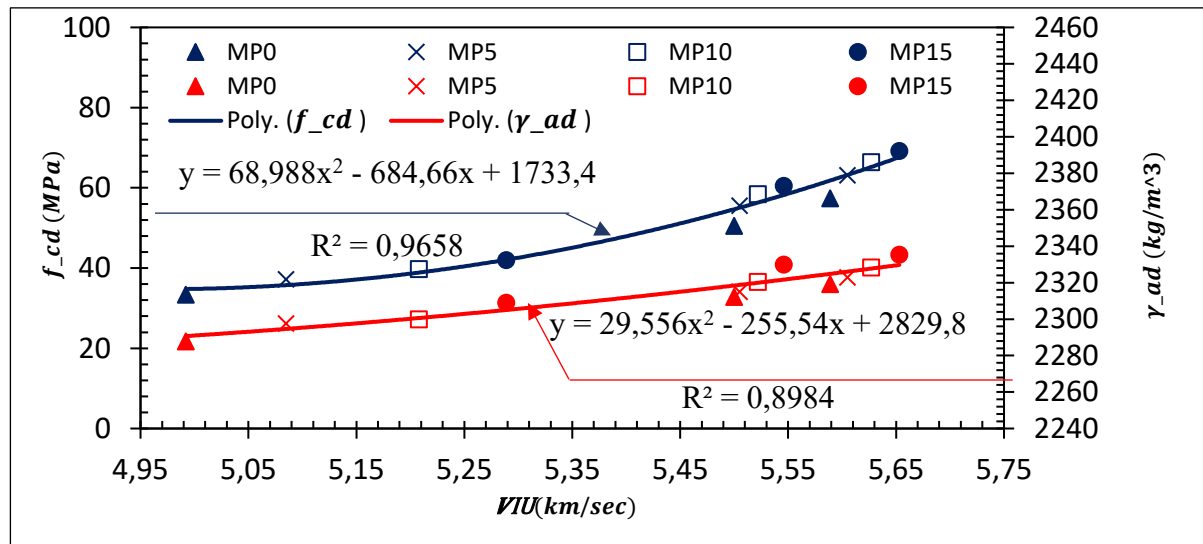
Figure 3.9 : Valeurs de VIU des mélanges de BHP à différents âges pour :
 (a) BHP+PM% ; (b) BHPFS+PM% ; (c) BHPLHFB+PM%

La corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion, la densité apparente et la vitesse d'impulsion de tous les mélanges de BHP à 7, 28 et 90 jours est représentée dans la figure 3.8. Une relation polynomiale robuste (linéaire multiple) existe entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion, comme le montre la figure 3.8. La résistance à la compression peut être estimée en utilisant une équation polynomiale du 2^{ème} degré ($f_{cd}=a (VIU)^2+b (UPV)+c$) démontrant un coefficient de corrélation (R^2) élevé de 0,97, 0,96 et 0,88 respectivement pour BHP+PM%, BHPFS+PM% et BHPLHFB+PM%. Un schéma comparable a été observé par (Belaribi et Mellas 2013) qui ont utilisé des fibres de polypropylène dans le béton.

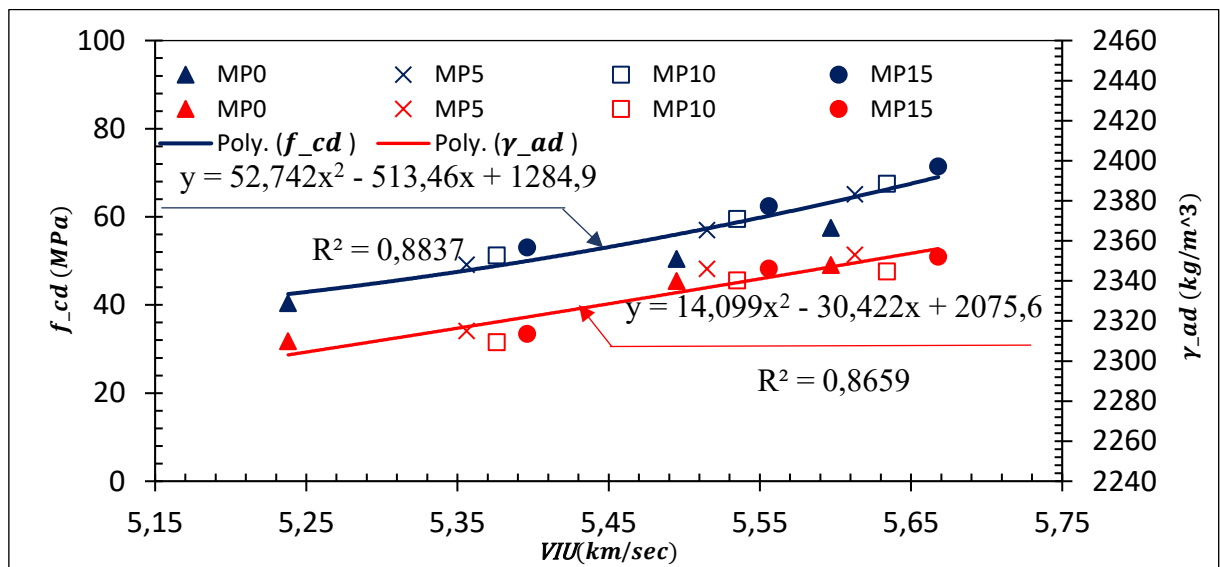
Comme le montre la figure 3.10, une forte relation polynomiale ($f_{cd}=a (\gamma_{ad})^2+b (\gamma_{ad})+c$) est apparente entre la densité et la vitesse d'impulsion pour tous les mélanges de BHP. Ces deux paramètres présentent une corrélation remarquable, illustrée par des valeurs respectives de R^2 de 0,94 pour BHP+PM%, 0,89 pour BHPFS+PM% et 0,86 pour BHPLHFB+PM%. Cette correspondance peut s'expliquer par la présence de constituants fins dans le BHP qui occupent les vides. De plus, la densité solide accrue de PM, dépassant celle du sable, contribue à cette relation. De plus, l'influence de la teneur en MP renforce davantage cette relation. En essence, cela souligne l'impact prédominant de la teneur en PM à la fois sur la densité et sur la vitesse d'impulsion.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.10 : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion, ainsi que la densité et la vitesse d'impulsion des mélanges de BHP à différents âges pour :

(a) BHP+MP%, (b) BHPFS+MP%, et (c) BHPLHFB+MP%

3.2.7. Module d'élasticité dynamique :

Le module d'élasticité dynamique des mélanges de béton a été évalué en utilisant le modèle suivant (Güneyisi & Gesoğlu. 2007):

$$E_d = 10^5 \times V^2 \times (\Delta/g) \quad (3-1)$$

Où E_d est le module d'élasticité dynamique (GPa), V est la vitesse d'impulsion ultrasonore (m/s), Δ est la densité apparente du béton (kg/m³) et g est l'accélération due à la gravité (m/s²).

Les résultats du module d'élasticité dynamique pour tous les mélanges de BHP à 28 jours sont illustrés dans la Figure 3.11. On observe que le remplacement du ciment par 8 % de FS et LHFB a légèrement augmenté le module d'élasticité dynamique. Une tendance similaire a été observée par (Khodabakhshian et al. 2018), qui ont utilisé de la FS et de PM comme substitution partielle du ciment. L'introduction de 15 % de PM dans les mélanges de BHP augmente progressivement le module d'élasticité dynamique de 18,30 %, 19,60 % et 23,70 % pour le BHP, le BHPFS et le BHPLHFB, ce phénomène est attribuable à la compacité des BHP favorisée par la présence de la PM dans les mélanges. Le module d'élasticité dynamique le plus élevé est obtenu à partir du mélange BHPLHFB+15 % PM, qui présente également la résistance à la compression la plus élevée. Des observations similaires ont été faites par (Li et al. 2014) et (Atahan et al. 2012). Cela indique que le module d'élasticité dynamique est étroitement lié à la résistance à la compression.

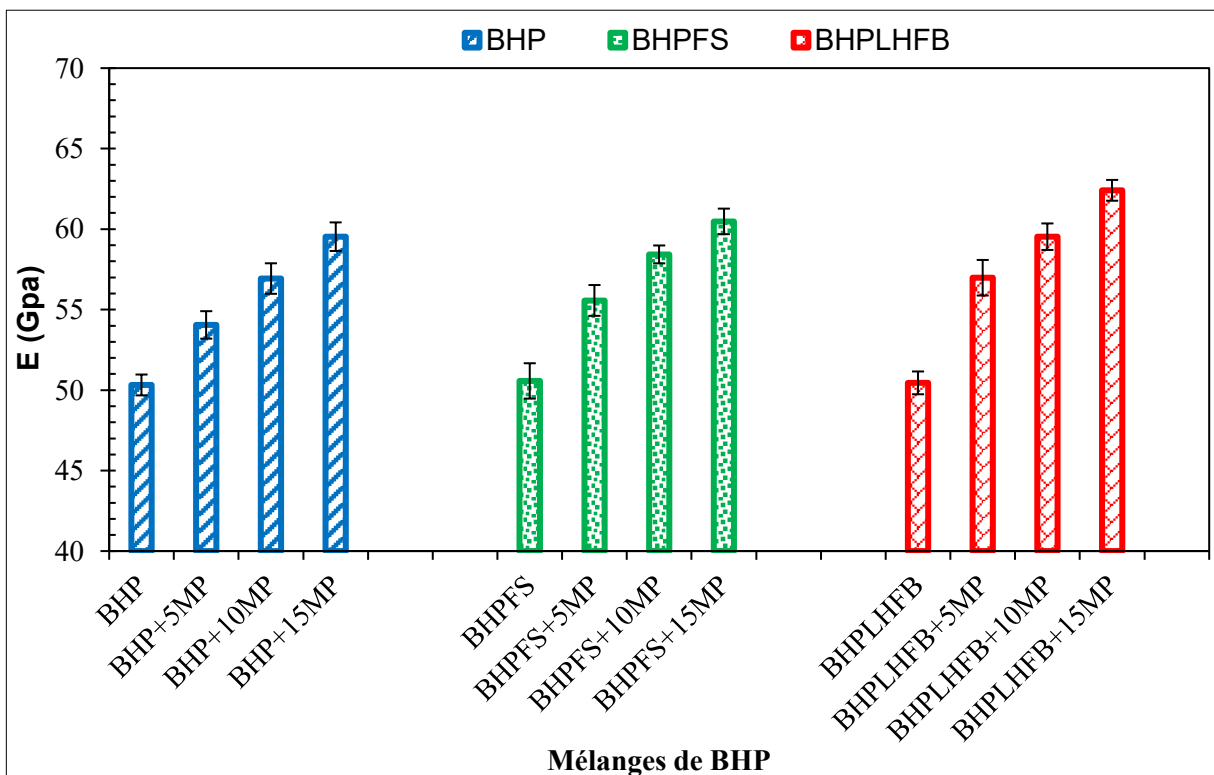


Figure 3.11 : Valeurs du module d'élasticité dynamique des mélanges de BHP

3.3. Effet de l'introduction de SM sur les propriétés du BHP

3.3.1. Ouvrabilité :

La Figure 3.12 montre les valeurs de l'affaissement des mélanges de BHP. On peut observer que la maniabilité des mélanges de BHP contenant du LHFB n'est pas significativement affectée par sa substitution du CPO. Cependant, tous les mélanges de BHP contenant de la FS ont des valeurs de maniabilité inférieures à celles des autres mélanges de BHP. De plus, l'augmentation de la teneur en SM dans la composition du BHP entraîne une augmentation progressive des valeurs de la maniabilité. Avec 40% de SM, la maniabilité augmente de 16,66, 21,42 et 15,78% pour les mélanges de BHP contenant respectivement de CPO, de la FS et du LHFB. Une observation similaire a été faite par (Kore et Vyas . 2016) et (André et al. 2014) qui ont utilisé du sable de marbre comme granulat. Ils ont attribué cette augmentation à la nature lisse de la surface du SM, ce qui réduit les frottements entre les composants du béton. (Corinaldesi et al. 2010) et (Djebien et al. 2015) ont également rapporté que les fines contenues dans le SM confèrent une plus grande cohésion au béton, ce qui facilite l'écoulement du béton.

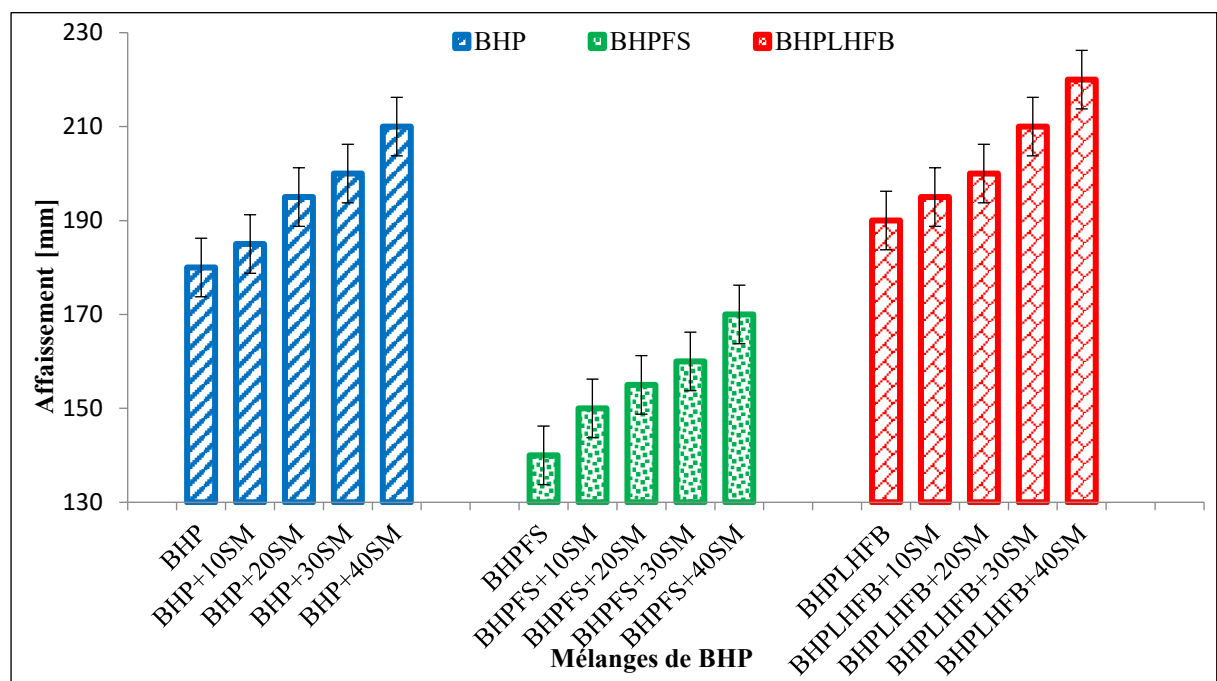


Figure 3.12 : Maniabilité des mélanges de BHP

3.3.2. Densité :

Les résultats du test de densité pour les différents mélanges de BHP sont présentés dans la Figure 3.13.

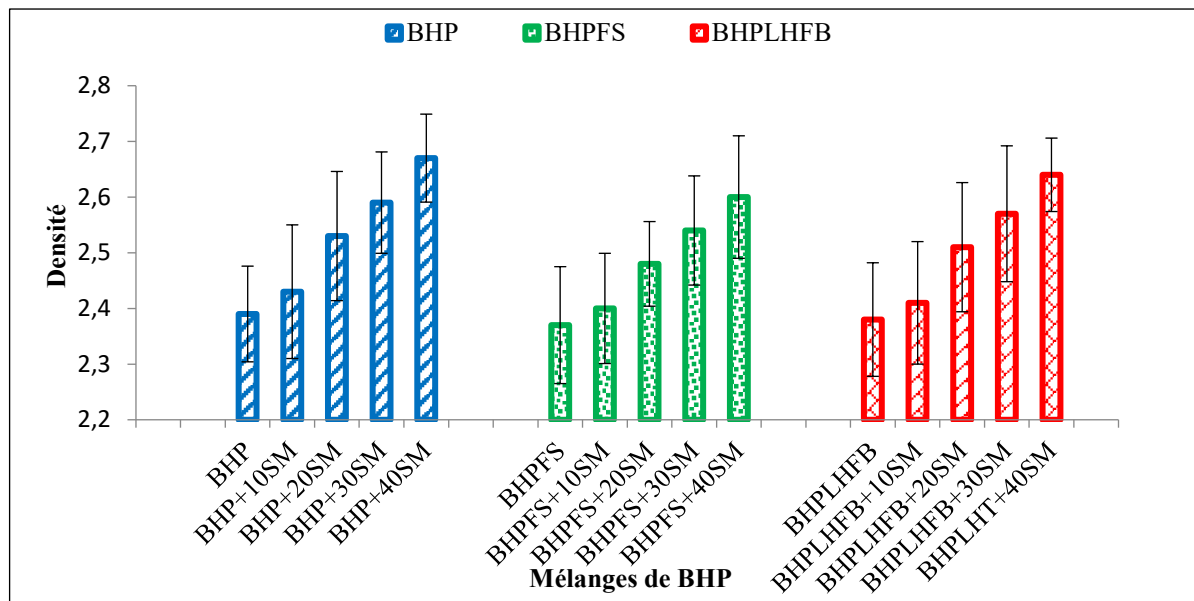


Figure 3.13 : Valeurs de densité des mélanges de BHP

Comme le montre le graphique, l'augmentation de la teneur en SM augmente progressivement la densité du BHP. En effet, les mélanges de BHP contenant 40% de SM présentent une augmentation maximale de 11,71%, 9,70% et 10,92% respectivement pour les mélanges de BHP, BHPFS et BHPLHFB. Il est également à noter que l'utilisation de la FS en remplacement du ciment entraîne une diminution de la densité du BHP. Le BHPFS présente une densité inférieure de 0,84% par rapport au BHP de control. La densité du béton dépend principalement de la densité de ses composants (Han et al. 2005). Le SM a une densité plus élevée par rapport aux autres granulats et son introduction entraîne une augmentation de la densité des mélanges de BHP. En revanche, la FS a une densité plus faible par rapport au CPO et au LHFB, et donc le BHP contenant de la FS présente une densité inférieure aux autres mélanges de BHP.

3.3.3. Teneur en air occlus :

Comme indiqué dans la Figure 3.14, l'utilisation de la FS en remplacement du CPO dans la composition du BHP réduit la valeur de la teneur en air de 3,40 à 3%. Cette tendance s'explique par l'amélioration de la compacité du BHP et le remplissage des pores par la FS (Lee. 2020) et (Tao et al. 2022). On peut également noter que l'utilisation du SM réduit significativement la teneur en air du BHP. Avec 40% de SM, les valeurs de teneur en air sont réduites de 35,29%, 26,66% et 31,25% pour les BHP contenant respectivement du CPO, de la FS et du LHFB. Cette tendance a été observée par (Hebhoub et al. 2011) qui ont constaté que

l'utilisation de 75% de SM en tant que filler diminuait la teneur en air de 33,33%. (Singh et al. 2017) ont observé que la teneur en air diminuait de 19,23% lorsque la teneur en DM passait de 0 à 25%. La diminution de la teneur en air s'explique par l'effet de remplissage des fines contenues dans le SM, ce qui entraîne la densification du mélange de béton (Singh et al. 2017).

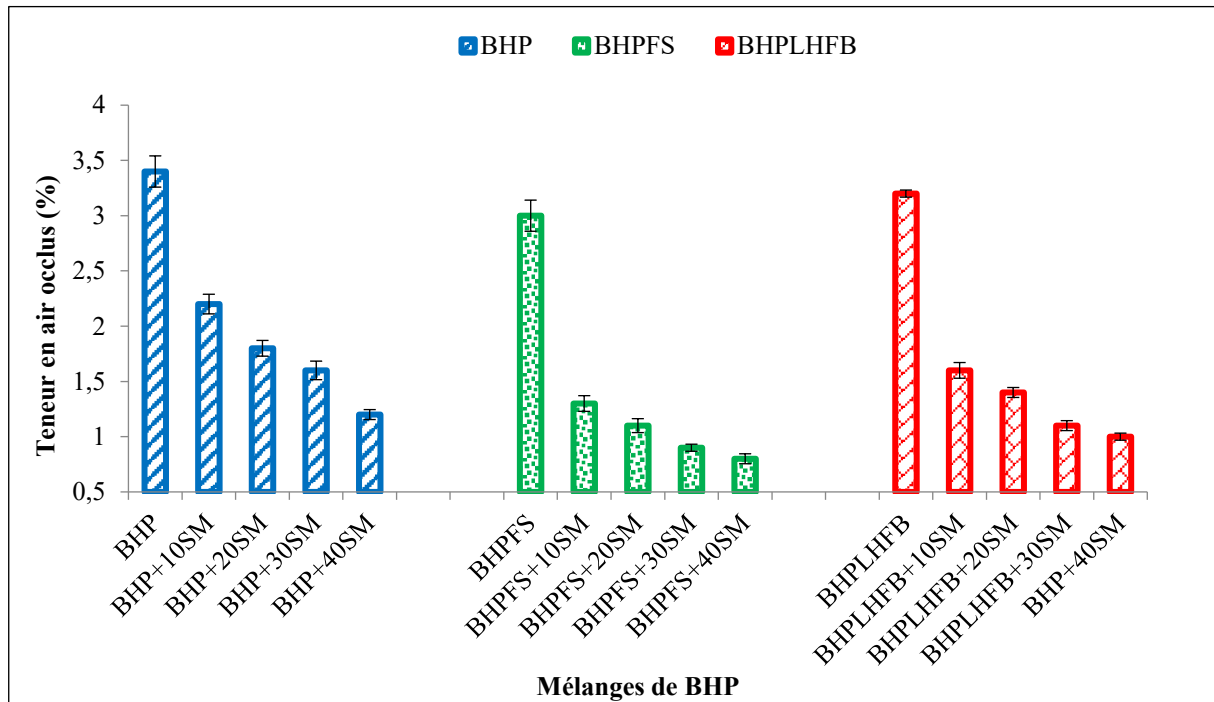


Figure 3.14 : Valeurs de la teneur en air occlus des mélanges de BHP

3.3.4. Résistance à la compression :

La variation de la résistance à la compression des mélanges de BHP à 7, 28 et 90 jours est illustrée dans la Figure 3.15. Tous les mélanges de BHP montrent une amélioration significative de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en SM. Pour les BHP contenant du CPO, de la FS et du LHFB, la résistance à la compression à 90 jours augmente de 25,35%, 23,61% et 30,98% lorsque 40% de SM est introduit. Plusieurs études antérieures corroborent ces résultats. (Hebhoub et al. 2011) ont constaté que la résistance à la compression augmentait de 23,65% lors de l'utilisation de 50% de SM. (Vardhan et al. 2019) ont rapporté que l'ajout de 40% de SM conduit à augmenter la résistance à la compression du béton de 22,40%. L'amélioration de la résistance à la compression s'explique par la capacité de remplissage du SM qui améliore la compacité du béton (Ali and Hashmi. 2014, Nochaiya. 2010). (Vardhan et al. 2019) ont ajouté que la forme angulaire du SM améliore l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment dans la ZTI. Il peut également être observé à partir de la

figure 3.13 que tous les mélanges de BHP contenant de la FS et du LHFB montrent une augmentation de la résistance à la compression par rapport au mélange de BHP contenant du CPO. À 7 jours, la résistance à la compression du mélange de BHP contenant de la FS augmente de 0,55%, tandis que le mélange de BHP contenant du LHFB présente une augmentation de la résistance à la compression de 21,59% par rapport au mélange de BHP contenant du CPO. Cette tendance montre l'effet positif de l'utilisation combinée du CPO avec la FS et du LHFB sur le comportement mécanique du BHP. (Siddique. 2011) et (Koksal et al. 2008) ont expliqué l'amélioration de la résistance à la compression du béton contenant de la FS par le renforcement de la liaison pâte de ciment-granulat dans la ZTI, ce qui conduit à une diminution du volume poreux et rend la microstructure du béton plus homogène. (Tan et Pu. 1998) ont constaté que l'incorporation de 20% de LHFB en remplacement du ciment dans la composition du béton augmentait la résistance à la compression de 11,51%. Cette tendance a également été observée par (Bernard et al. 2022, Topçu et Boga. 2010), et est attribuée aux propriétés cimentaires et au remplissage microscopique des vides par le LHFB (Karakurt and Dumangöz. 2022) et (Ahmad et al. 2022).

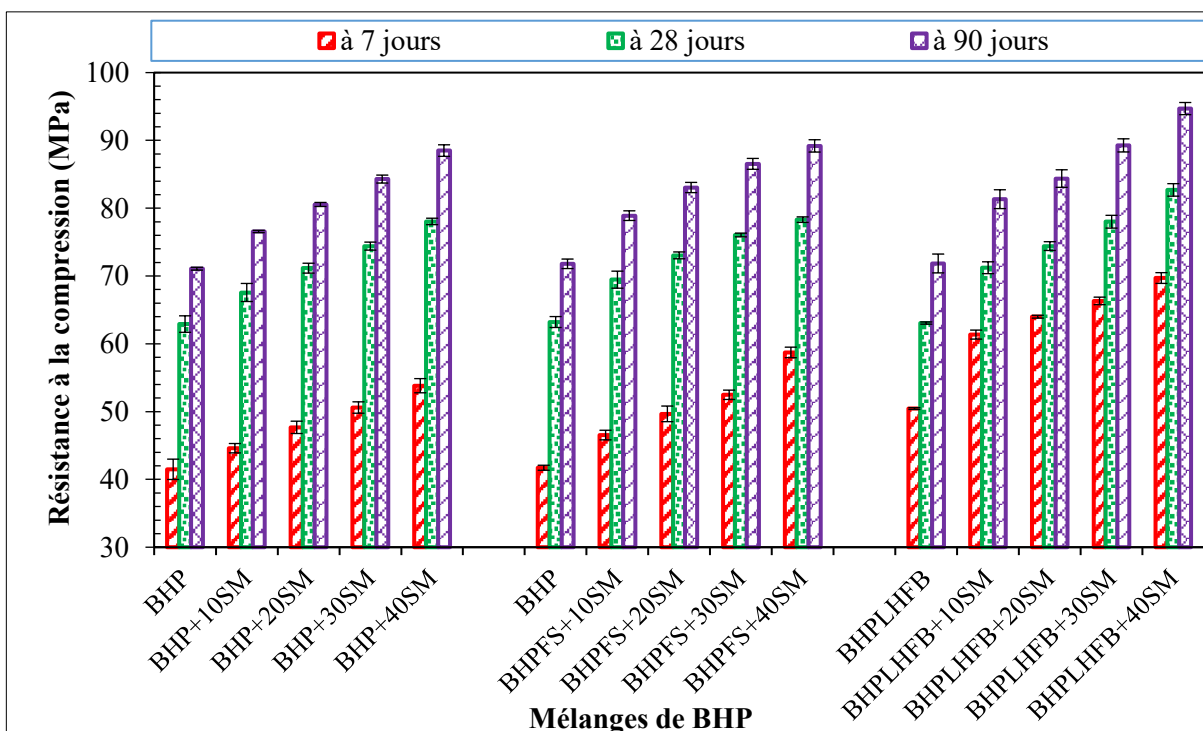


Figure 3.15 : Valeurs de la résistance mécanique des mélanges de BHP

La Figure 3.16 présente l'impact de la cure sur la résistance des BHP après 28 jours d'immersion dans l'eau. Il est remarqué que le milieu de conservation des échantillons de BHP joue un rôle important dans leur résistance à la compression pendant la phase de durcissement.

Une augmentation de la résistance de 9,82 %, 10,75 % et 12,29 % a été observée respectivement pour les mélanges de BHP, BHPFS et BHPLHFB conservés dans l'eau et contenant 40 % de sable de marbre. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par (Aitcin et al. 1996) et (Safiuddin et al. 2007). Cette amélioration est attribuée au processus de durcissement des BHP en l'absence d'évaporation de l'eau.

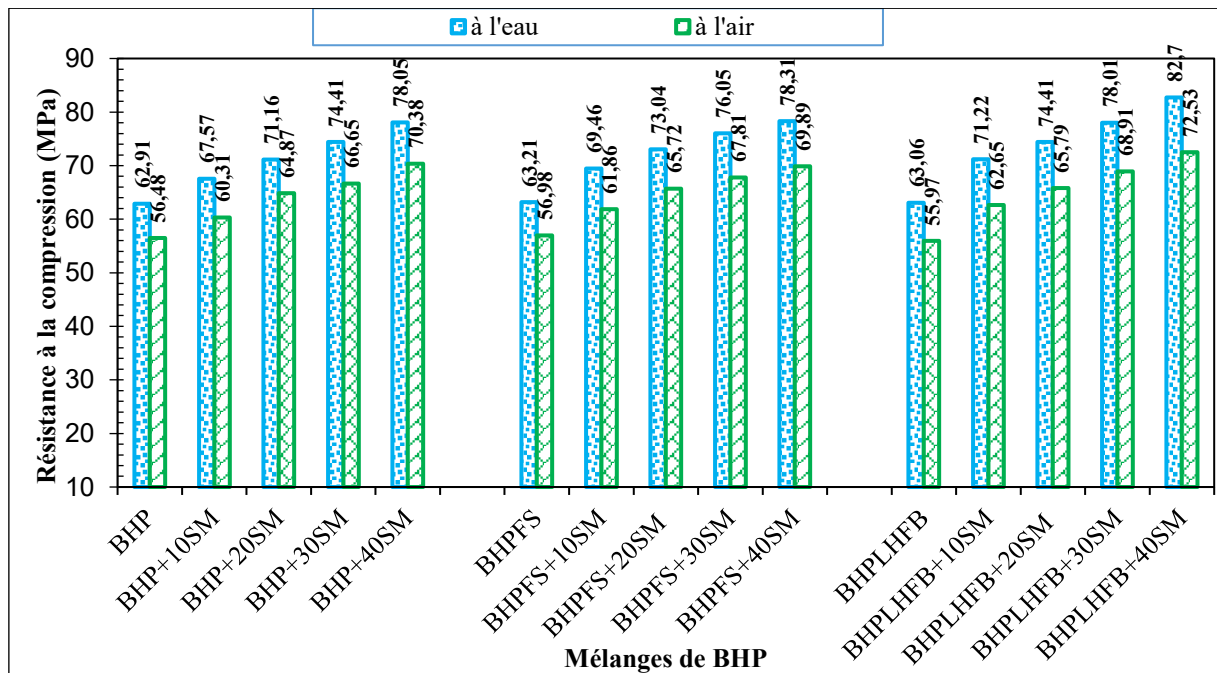


Figure 3.16 : Influence du mode de cure sur la résistance mécanique à 28 jours des mélanges de BHP

3.3.5. Résistance à la flexion :

Selon la Figure 3.17, la résistance à la flexion des mélanges de BHP suit la même tendance que la résistance à la compression. La résistance à la flexion s'avère être améliorée avec l'augmentation du contenu en SM pour tous les mélanges de BHP. Une augmentation maximale de la résistance à la flexion de 26,90 % est observée pour le mélange BHPLHFB+40SM contenant 36 kg de LHFB et 40 % de SM. Cette augmentation s'explique par la capacité de remplissage du SM et l'amélioration de la liaison dans la ZTI du béton (Vardhan et al. 2019).

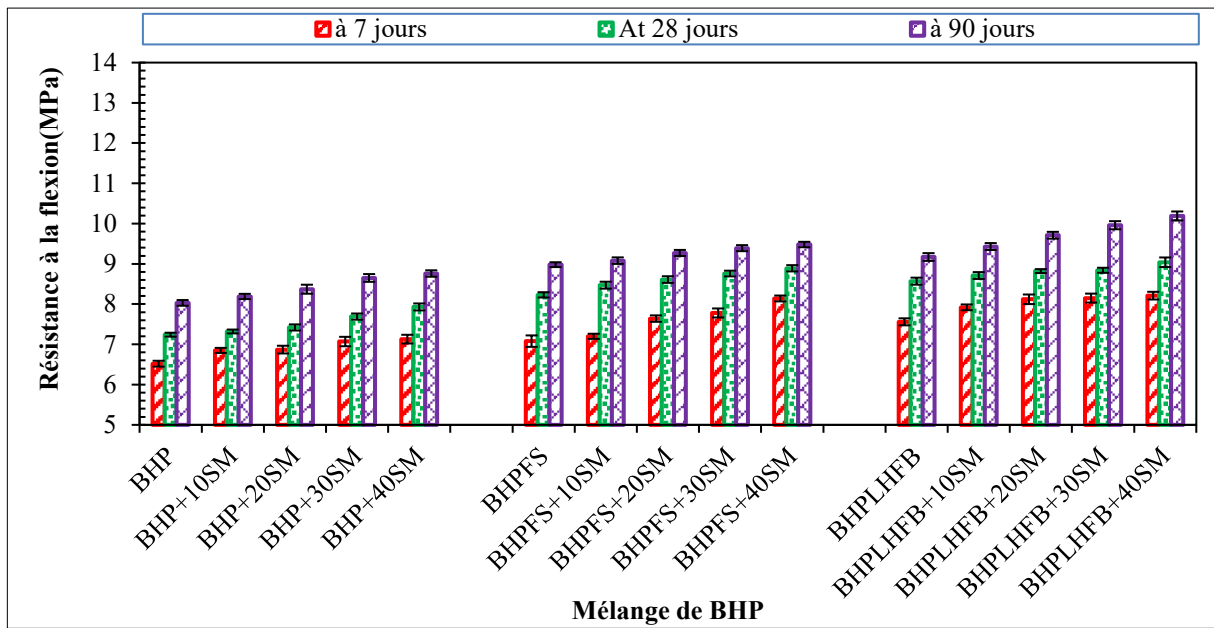


Figure 3.17 : Valeurs de la résistance à la flexion des mélanges de BHP

Comme le montre la Figure 3.18, la conservation des échantillons de BHP dans l'eau améliore la résistance à la flexion de la même manière que la résistance à la compression, par rapport à tous les mélanges de BHP durcis à l'air libre. Cela s'explique par le phénomène de dessiccation et l'évaporation de l'eau à l'air libre, qui sont atténués lorsque les échantillons sont conservés dans l'eau.

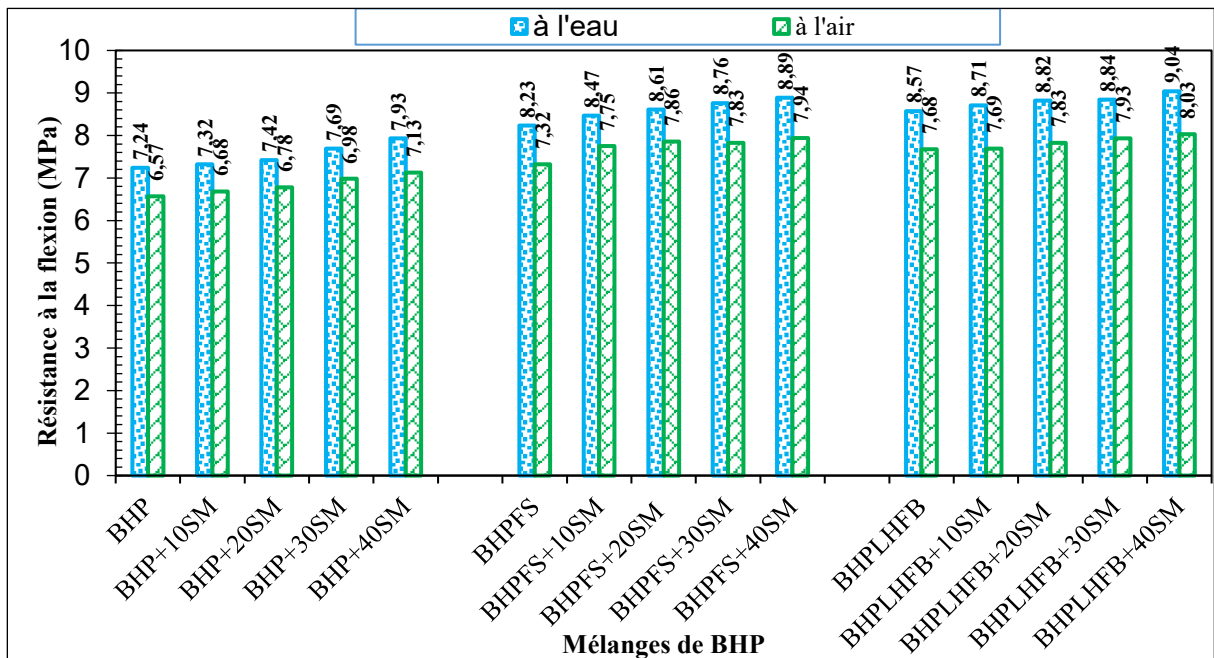
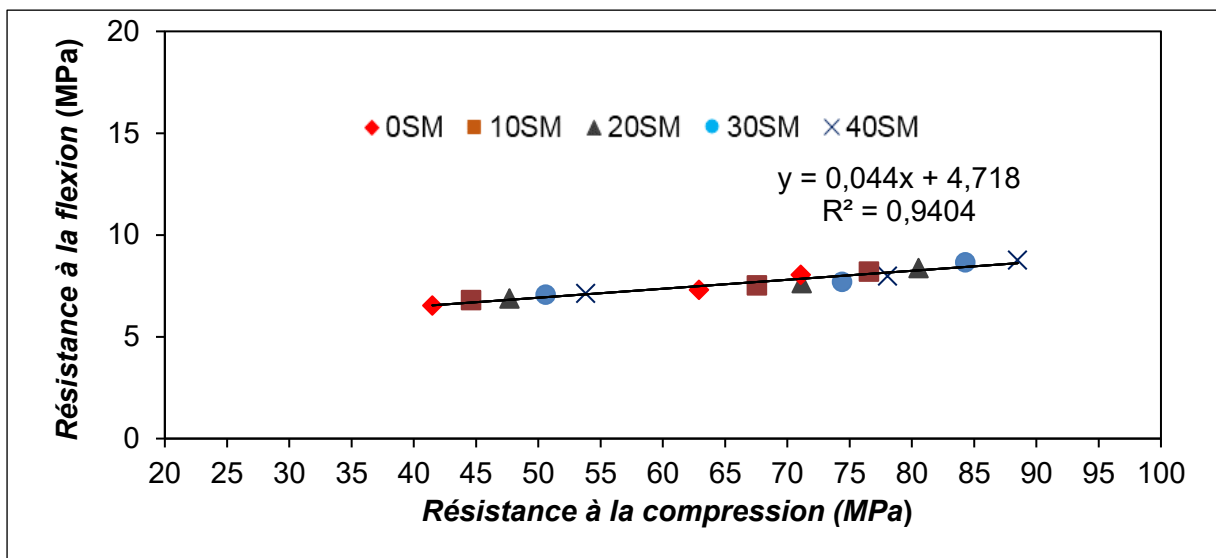
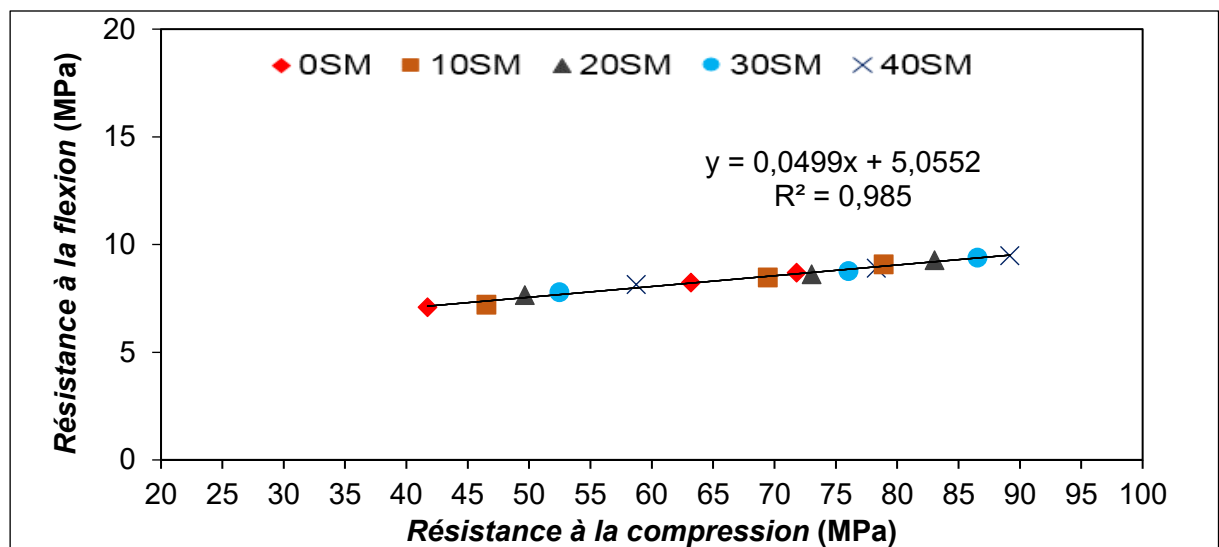


Figure 3.18: Influence du mode de cure sur la résistance à la flexion à 28 jours des mélanges de BHP

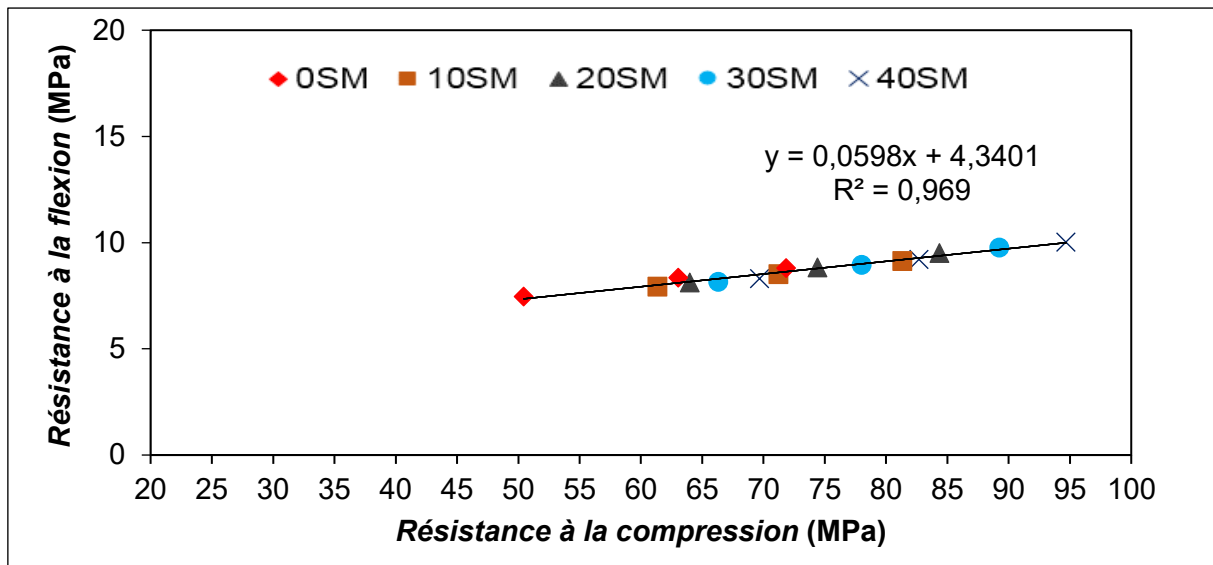
La relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression pour tous les BHP à 7, 28 et 90 jours est représentée dans la figure 3.19. Comme le montre la figure, il existe une relation linéaire entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation élevé R^2 égal à 0,94 pour les BHP à la base de SM, 0,98 pour les BHPFS contenant de SM et 0,96 pour le BHPLHFB+SM%. Cette forte corrélation peut être attribuée à la distribution uniforme de la résistance à la flexion. Une observation similaire a été remarquée par (Basar et Aksoy, 2012) qui ont utilisé du sable de fonderie recyclé comme substitution partielle du sable dans le béton et ont constaté que la résistance à la compression et la résistance à la flexion sont corrélées entre elles et que la résistance à la flexion du béton représente 9 à 10 % de la résistance à la compression.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.19 : Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression à différents âges pour : (a) BHP+SM% ; (b) BHPFS+SM% ; (c) BHPLHFB+SM%

3.3.6. Vitesse des impulsions ultrasoniques :

Les résultats du test de Vitesse des Impulsions Ultrasoniques (VIU) pour tous les mélanges de BHP à 28 jours sont illustrés dans la Figure 3.20. On peut observer que l'utilisation de la FS et du LHFB augmente légèrement les valeurs de VIU de 0,23 et 0,14 % pour les mélanges de BHP à base de FS et de LHFB respectivement. On peut également remarquer que l'incorporation de SM a un effet positif sur les valeurs de VIU. Ce phénomène s'explique par la densité plus élevée du SM, qui remplit les vides dans le BHP, entraînant ainsi une diminution de la porosité (Boughamsa et al. 2020). Tous les mélanges de BHP ont montré une augmentation graduelle de VIU avec l'augmentation de la teneur en SM. Une augmentation maximale de 1,82 % est enregistrée pour le mélange BHPLHFB + 40SM. Il convient également de noter que selon la norme ASTM C597, qui considère le béton comme ayant une très bonne qualité lorsque VIU est supérieur à 4500 m/s, tous les mélanges de BHP sont classés comme ayant une très bonne qualité.

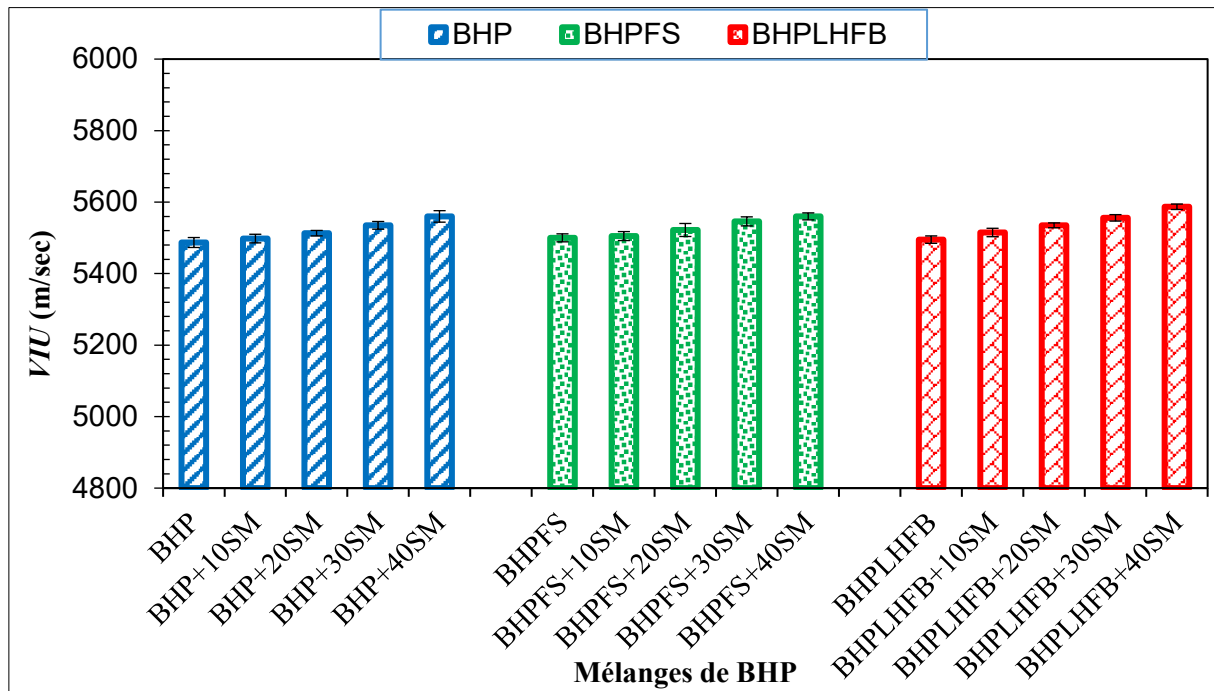


Figure 3.20 : Valeurs de VIU des mélanges de BHP

La relation entre la résistance à la compression et les valeurs de VIU pour tous les mélanges de BHP contenant du SM à 28 jours est représentée dans la Figure 3.21. Comme le montre le graphique, il existe une bonne relation entre la résistance à la compression et VIU avec un coefficient de corrélation élevé R^2 égal à 0,94 pour tous les mélanges.

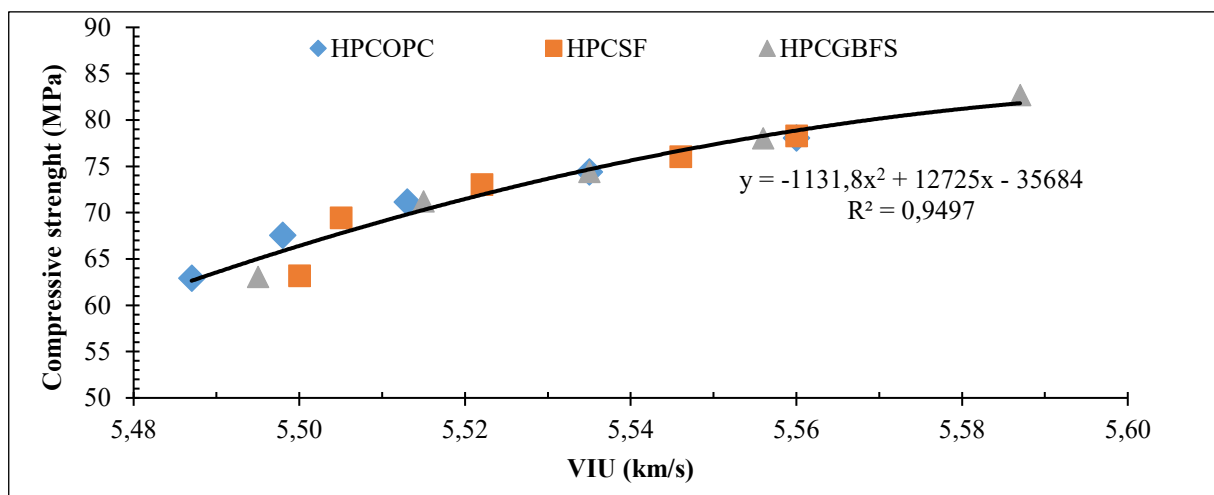


Figure 3.21 : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion des mélanges de BHP

3.3.7. Module d'élasticité dynamique :

En utilisant la même formule (3-1) mentionnée dans le paragraphe 3.2.7 pour l'évaluation du module d'élasticité dynamique des mélanges de BHP à base de SM contenant la FS ou LHFB.

Les valeurs du module d'élasticité dynamique pour tous les mélanges de BHP sont illustrées dans la Figure 3.22. Comme pour la résistance à la compression, le module d'élasticité dynamique augmente avec l'augmentation du SM. Avec 40% de SM, le module d'élasticité dynamique augmente de 5,90, 3,30 et 4,12% pour le BHP contenant respectivement du CPO, de la FS et du LHFB. Des résultats similaires ont été trouvés par (Binici et al. 2008) et (Singh et al. 2017), qui ont attribué cette augmentation à l'amélioration de la compacité des mélanges par l'effet de remplissage du SM.

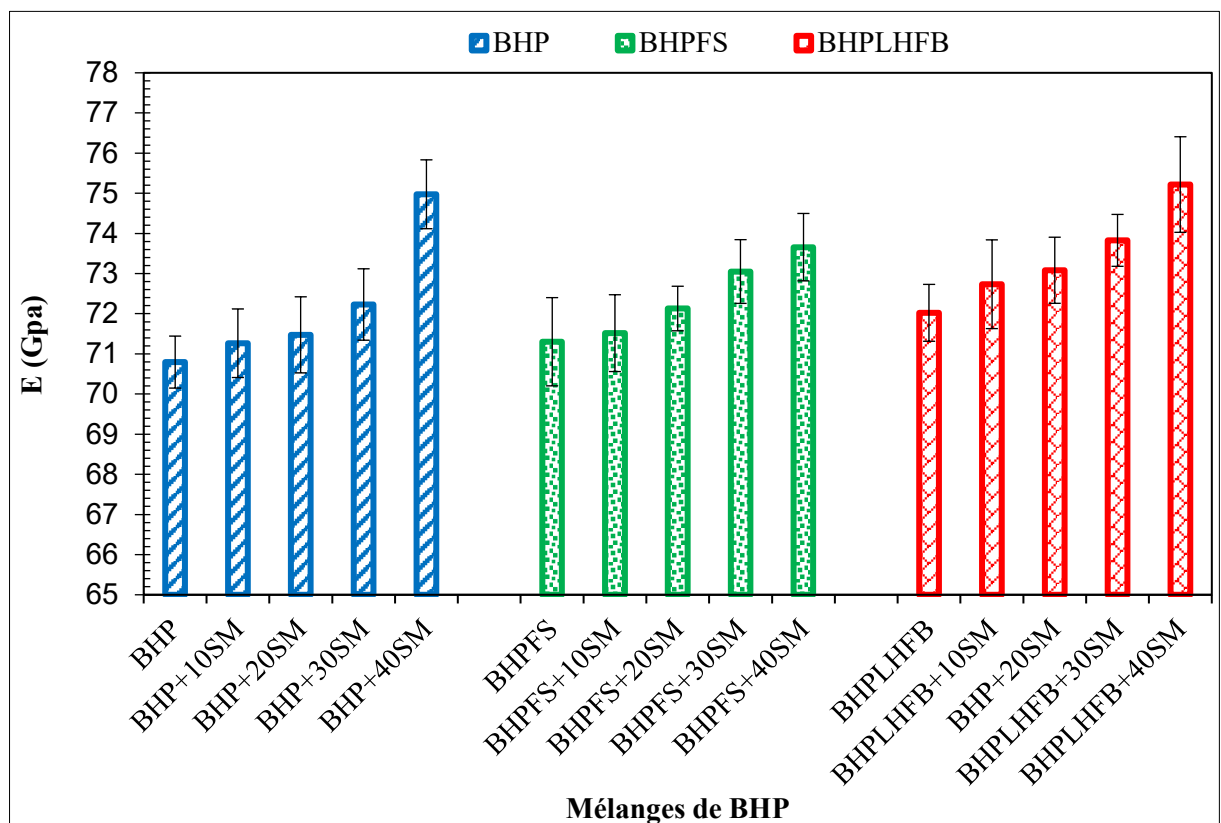


Figure 3.22: Valeurs du module d'élasticité dynamique des mélanges de BHP

L'efficacité de l'introduction de DM dans la fabrication des BHP peut être évaluée en comparant les propriétés essentielles des BHP à base de PM avec ceux à base de SM. Les deux approches offrent des avantages distincts :

- Les BHP à base de PM et SM montrent généralement une amélioration significative de la résistance initiale et finale à la compression avec des augmentations maximales de 41,45% pour le BHPFS+15PM à 28 jours et de 40,77% pour le BHPFS+40SM à 7 jours,

ainsi qu'à la flexion avec des augmentations maximales de 9,95% et 14,97% pour BHPFS+15PM et BHP+40SM respectivement à 7 jours.

- De plus la présence de DM peut contribuer à une réduction notable de quantité d'air atteignant 75% pour BHPFS+15PM et 73,33% pour BHPFS+40SM.
- L'introduction de 15 % de PM dans les différents mélanges de BHP conduit à des valeurs de propriétés physiques et de résistances à la compression et à la flexion plus ou moins proches de celles des BHP à base de 40 % de SM.

3.4. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais réalisés sur les BHP formulés. L'objectif de cette étude était d'examiner l'impact de l'utilisation combinée de sous-produits industriels (FS, LHFB) ainsi que de DM sous forme de PM et SM sur les propriétés physiques et mécaniques des BHP. Des substitutions partielles de sous-produits industriels (SF et LHFB) et de DM sous forme de (PM et SM) ont été réalisées pour remplacer respectivement le ciment et le sable. En examinant les résultats expérimentaux obtenus pour un taux de substitution similaire de 10 % de sable par PM ou SM, voici ce que l'on constate :

- Une augmentation de l'ouvrabilité est observée, variant de 4,87 à 9,67% pour les BHP à base de PM et de 2,63 à 7,41% pour ceux à base de SM.
- Une très faible augmentation de densité a été observée pour les BHP contenant SM tandis qu'elle varie de 4,68 à 5,50% pour les BHP à base de PM.
- La PM et le SM jouent tous deux un rôle crucial dans la réduction de la quantité d'air dans les différents mélanges de BHP, variant de 51,61 à 71,43 % et de 35,29 à 56,66 % pour ceux contenant respectivement de la PM et du SM.
- Les mélanges de BHP à base de PM ont montré des augmentations maximales de la résistance à la compression allant de 18 à 33,80 % à 28 jours. En revanche, pour les mélanges à base de SM, des augmentations maximales de 7,49 à 21,62 % ont été observées à 7 jours.
- Une augmentation de la résistance à la flexion a été observée à 7 jours, avec des valeurs allant de 1,69 à 5,06 % pour les mélanges de BHP contenant du SM, et de 5,46 à 7,86 % pour ceux contenant de la PM.
- La présence de PM dans les mélanges de BHP entraîne une augmentation du module d'élasticité dynamique pouvant aller jusqu'à 18 %, tandis que pour le SM, cette augmentation ne dépasse pas 0,98 %.

A cet effet, il est recommandé d'incorporer ces déchets par utilisation simple ou combinée dans la formulation du BHP. Ceci vise à diversifier les sources d'approvisionnement en matériaux de construction tout en contribuant à la préservation de l'environnement.

Chapitre 4 :

Durabilité des bétons à hautes performances à base de déchets de marbre combinés avec la fumée de silice ou le laitier de haut fourneau broyé

Chapitre 4 : Durabilité des BHP à base de DM combinés avec FS ou LHFB

4.1. Introduction

La durabilité du BHP se réfère à sa capacité à conserver ses caractéristiques physiques et ses propriétés mécaniques de manière satisfaisante pendant toute la durée de vie prévue de la structure où il est utilisé (Kong. 2013). Cela implique la capacité du BHP à résister aux forces appliquées sur la structure et à supporter les conditions environnementales auxquelles la structure, et donc le BHP, est exposé.

La durabilité d'un BHP est étroitement liée à sa perméabilité, qui mesure la facilité avec laquelle un fluide peut traverser le béton, y compris les fluides porteurs d'agents agressifs susceptibles, au fil du temps, de causer des dommages au béton et ainsi influencer sa durabilité. Les tests d'absorption d'eau et les tests de perméabilité dans des environnements agressifs sont des indicateurs cruciaux pour évaluer la durabilité du béton.

4.2. BHP à base de PM avec la FS ou LHFB

4.2.1 Absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau représente le volume des pores perméables et leur connectivité à l'intérieur du béton. Il constitue un facteur majeur qui affecte la durabilité (Afroughsabet et Ozbakkaloglu. 2015). Les résultats du test d'absorption d'eau par immersion des mélanges de BHP sont présentés dans la figure 4.1.

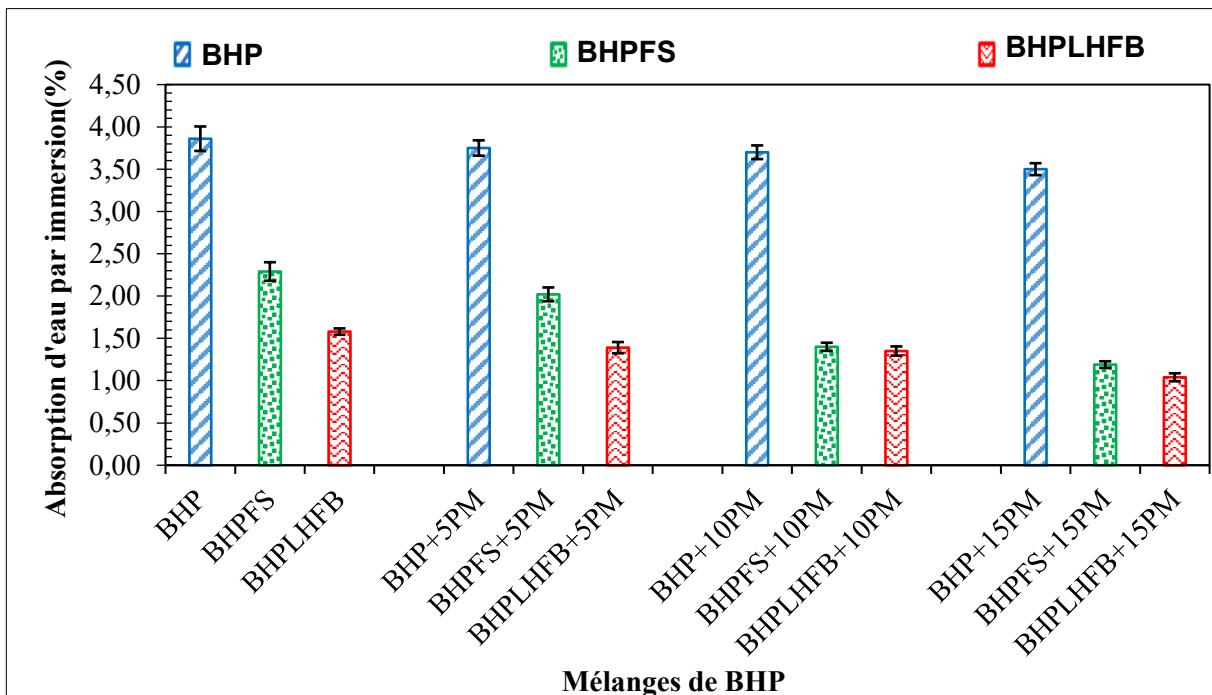


Figure 4.1 : Absorption d'eau par immersion des mélanges de BHP.

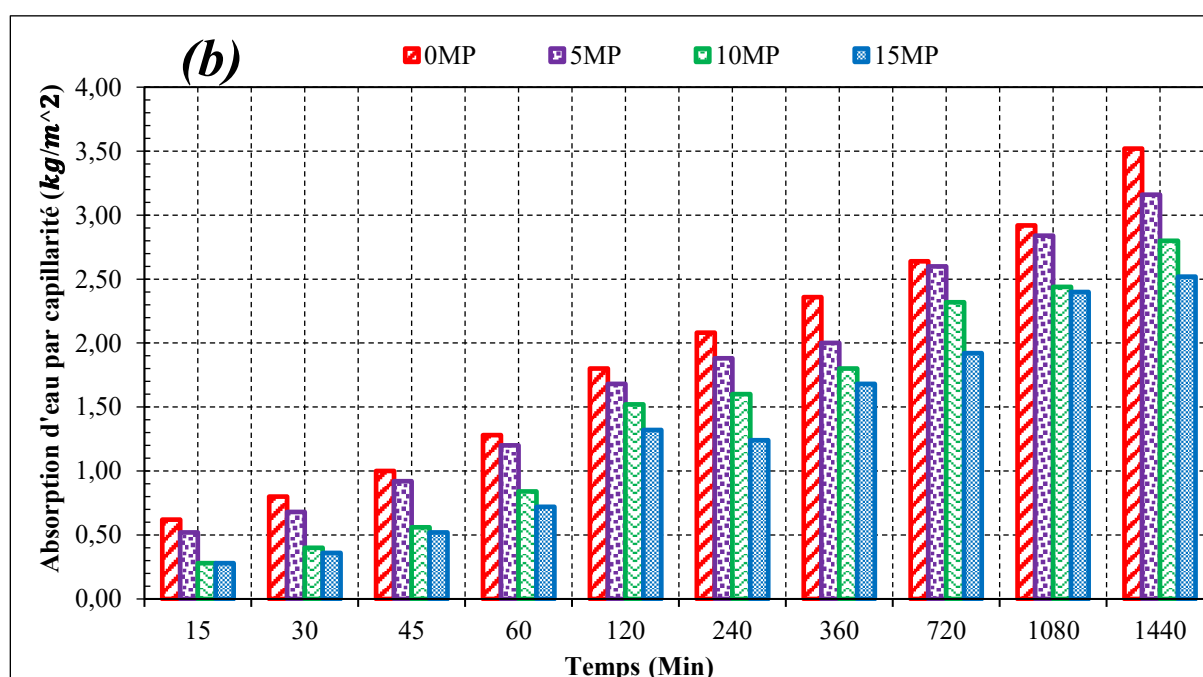
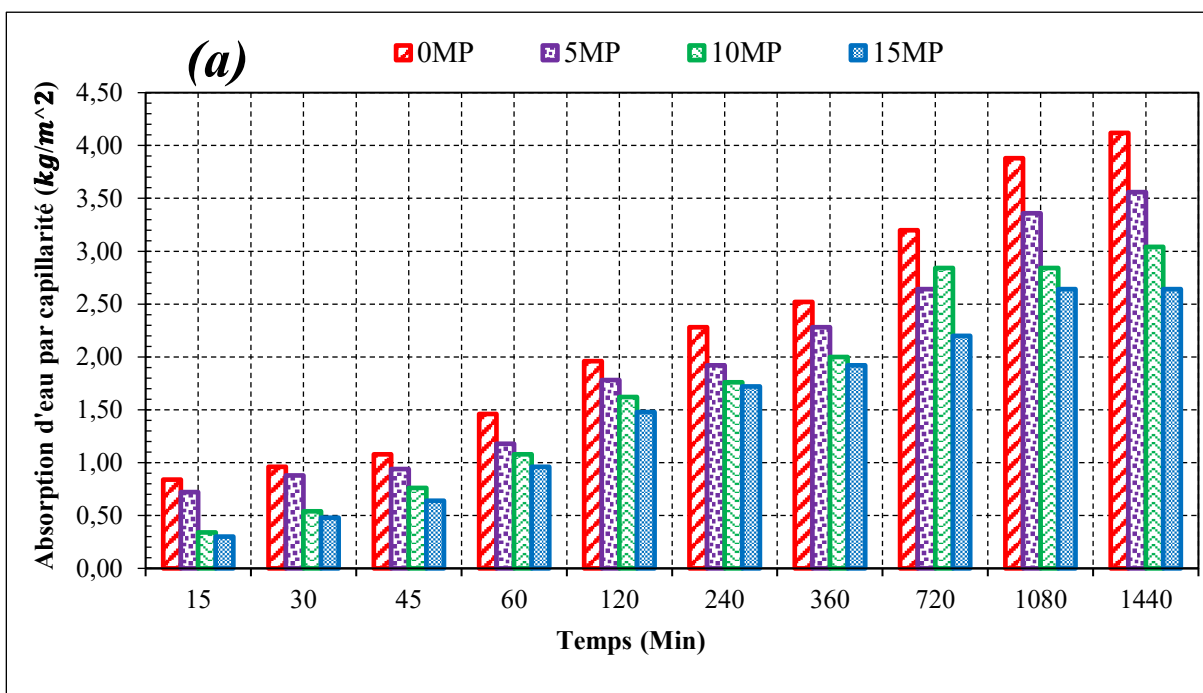
De la figure. 4.1, on peut noter que les valeurs d'absorption pour les mélanges de BHPSF et BHPLHFB sont inférieures à 40,67% et 59,06% respectivement au BHP standard. Selon (Khan. 2003) et (Poon et al. 2006), l'inclusion de la FS en tant que substitution partielle du ciment a entraîné des réductions plus significatives de la porosité dans les mélanges. Cette diminution est expliquée par l'effet de la FS sur la microstructure de la ZTI entre les pâtes de ciment Portland et les granulats (Rossignolo. 2008). Il a également été expliqué que les bétons contenant de la FS ont moins de pores grossiers que les bétons ordinaires (Igarashi et al. 2005). (Ahmad et al. 2022) ont constaté que la perméabilité du béton diminuait avec la substitution par LHFB, ajoutant que les bétons contenant 10% de LHFB et MK avaient une perméabilité plus faible que les bétons sans LHFB. La diminution de l'absorption d'eau du béton avec le LHFB est due à la réaction du LHFB avec l'hydroxyde de calcium et les alcalis libérés pendant l'hydratation du ciment Portland, ce qui modifie les tailles de pores et réduit la perméabilité du béton (Gesoglu et al. 2009). De plus, la diminution de la teneur en air en présence de SF et de LHFB (figure. 3.3) conduit à réduire l'absorption d'eau par immersion et à rendre le BHP moins poreux, plus compact et plus imperméable (Sampaio et al. 2017).

Il est visible sur la figure. 4.1 que l'absorption d'eau des échantillons contenant de la PM était inférieure à celle des échantillons sans PM. L'utilisation de 15% PM a conduit à une diminution de l'absorption d'eau de 9,32%, 48,03%, 34,18% pour BHP, BHPSF et BHPLHFB respectivement. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par (Evram. 2020), qui a observé une diminution de la pénétration de l'eau de 33%, 29% et 35% dans les mélanges de granulats en plastique avec 20%, 30% et 40% d'ajout de poussière de marbre (PDM). Une observation similaire a été remarquée par (Binici. 2007), qui a utilisé DM en tant que substitution partielle des agrégats fins, constatant qu'une augmentation de DM de 5 à 15% entraînait une diminution significative de la profondeur de pénétration de l'eau. Cela pourrait s'expliquer par les surfaces plus lisses du PM par rapport au granulats ordinaires (Hashmi et Siddique. 2022). C'était également dû à l'effet du remplissage et à la réaction pouzzolanique du PM (Sampaio et al. 2017).

4.2.2. Absorption d'eau par capillarité

Selon les données de la figure 4.2, l'insertion de FS et LHFB en tant que substituts partiels du ciment conduit à une diminution de l'absorption capillaire d'eau de 14,56% et 28,15% respectivement après 24 heures, par rapport au BHP standard. Cette baisse peut principalement être imputée à l'effet de micro-remplissage de la FS et du LHFB, ce qui réduit la perméabilité, comme souligné par (Ahmad et al. 2022).

l'ajout de 15% de PM entraîne une diminution de l'absorption capillaire d'eau de 35,92%, 28,413% et 32,43% respectivement pour le BHP, le BHPFS et le BHPLHFB après 24 heures. Ce phénomène peut être attribué à plusieurs facteurs. Tout d'abord, la présence de PM dans le BHP améliore l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats fins, tout en remplissant efficacement les pores du BHP.



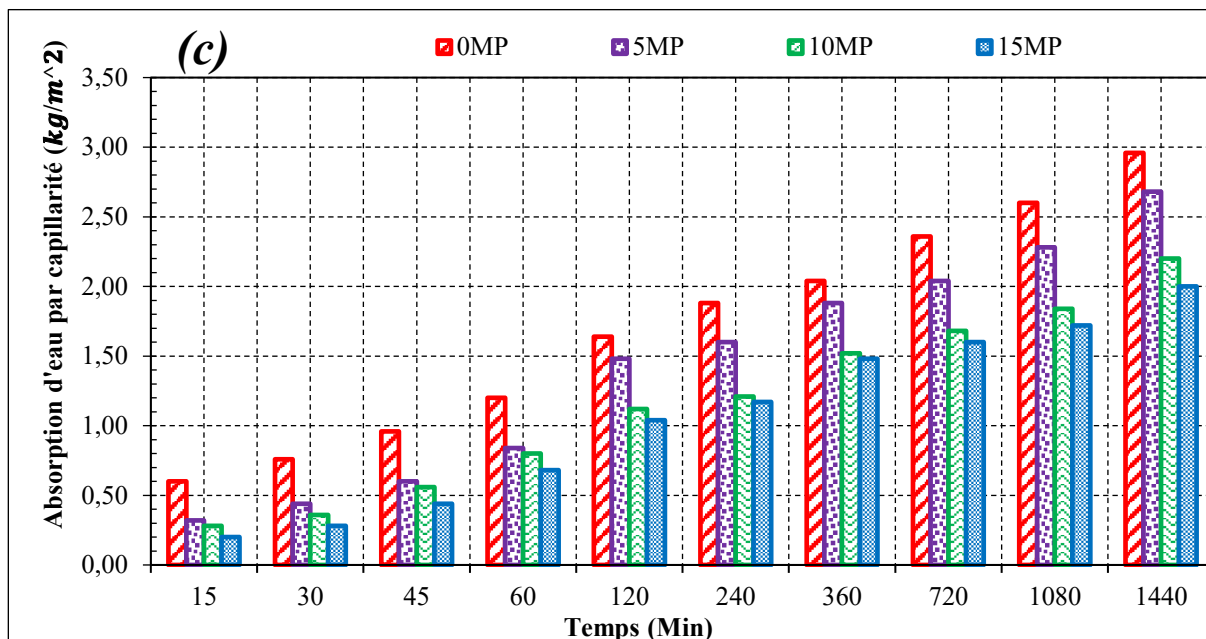


Figure 4.2 : Absorption d'eau par capillarité des mélanges de BHP en fonction du temps pour :
 (a) BHP+PM% ; (b) BHPFS+PM% ; (c) BHPLHFB+PM%

4.2.3. Attaques chimiques

Les essais d'attaque chimique offrent des informations sur la capacité des mélanges de BHP à maintenir leur intégrité et à résister à la fissuration lorsqu'ils sont exposés à des milieux acides, représentant des conditions rigoureuses. Cette résistance est évaluée en observant les variations de poids et de résistance à la compression des mélanges de BHP après l'exposition à l'attaque chimique.

4.2.3.1. Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique

Tableau 4.1 Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans H₂SO₄ des mélanges de BHP

Age (Jours)	PM (%)	Perte de Masse (%)		
		BHP + % PM	BHPFS + % PM	BHPLHFB + % PM
à 56 Jours	0	5.44	3.92	2.33
	5	3.86	3.23	2.11
	10	3.34	2.85	1.92
	15	2.76	2.41	1.49
à 90 Jours	0	8.97	7.55	4.53
	5	6.33	5.67	3.64
	10	5.12	4.33	3.13
	15	4.70	3.85	2.52
à 180 Jours	0	10.81	9.86	7.21
	5	8.97	6.70	4.91
	10	7.47	6.26	4.60
	15	7.36	5.73	3.87

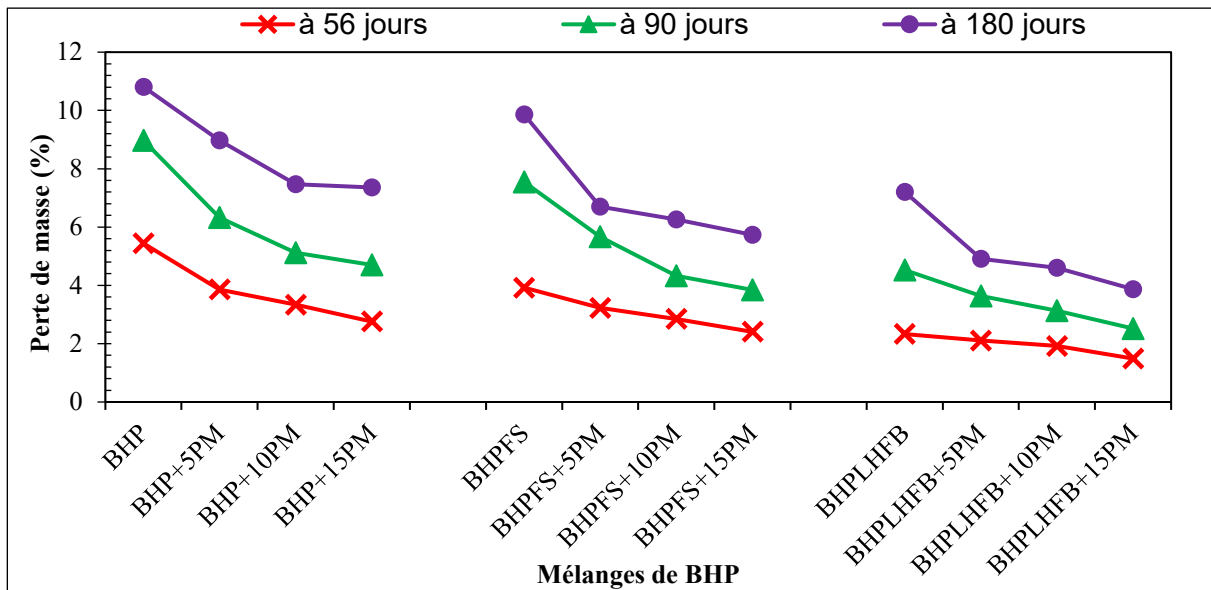


Figure 4.3 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans H_2SO_4 des mélanges de BHP

Le Tableau 4.1 et la Figure 4.3 illustrent l'évolution de la perte de masse au fil du temps pour divers mélanges de BHP immergés dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 5 % sur des périodes de 56, 90 et 180 jours. Les résultats démontrent qu'après 180 jours, la perte de masse a augmenté de 10,81 %, 9,86 % et 7,21 % respectivement pour le BHP, le BHPFS et le BHPLHFB. Notamment, les formulations de BHP intégrant 8 % de LHFB et de FS en substitution partielle du ciment montrent une résistance supérieure aux effets de l'acide sulfurique par rapport au BHP standard. Cette amélioration de durabilité peut être attribuée à l'effet de micro-remplissage de ces ajouts minéraux dans le BHP.

À mesure que le taux de substitution de la PM augmente de 0 % à 15 %, on observe une diminution de la perte de masse de 31,91 %, 41,87 % et de 46,32 % pour le BHP, BHPFS et BHPLHFB respectivement après 180 jours de stockage. Cette réduction de la perte de masse peut être attribuée à la concentration élevée en CaO dans la PM qui limite l'absorption de l'acide sulfurique par le BHP.

Comme illustré par le Tableau 4.2 et la Figure 4.4, la diminution de la résistance est significativement plus marquée dans le BHP standard, avec une dégradation croissante de la résistance observée au cours de la période d'immersion pour toutes les formulations. Il est à noter qu'à 180 jours, la diminution de la résistance dans les mélanges intégrant du FS et du LHFB est considérablement moindre, respectivement à 44,11 % et 39,62 %, par rapport au BHP standard qui connaît une dégradation de la résistance dépassant les 52 %. Cette disparité peut être attribuée à la réactivité pouzzolanique et aux effets de micro-remplissage du SF et du LHFB. Avec l'incorporation de PM jusqu'à 15 % dans les mélanges de BHP, la perte de

résistance diminue respectivement de 16,20 % pour le BHP, de 17,68 % pour le BHPFS et de 14,31 % pour le BHPLHFB après 180 jours d'immersion. Cette observation est en ligne avec les conclusions de (Karkurt et Dumangoz, 2022), suggérant que l'ajout de la PM dans les mélanges de BHP entraîne une réduction de la structure des pores, ce qui contribue à améliorer la résistance du BHP.

Tableau 4.2. Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H₂SO₄) des mélanges de BHP

Age (Jours)	PM (%)	Perte de résistance (%)		
		BHP + % PM	BHPFS + % PM	BHPLHFB + % PM
à 56 Jours	0	22.68	18.30	15.41
	5	19.85	16.70	14.61
	10	18.25	14.26	12.80
	15	15.40	13.56	11.44
à 90 Jours	0	36.67	29.28	26.20
	5	32.78	27.35	21.92
	10	30.43	25.47	20.80
	15	30.33	23.37	19.44
à 180 Jours	0	52.35	44.11	39.62
	5	47.12	41.17	37.80
	10	45.72	40.26	36.46
	15	43.87	36.31	33.95

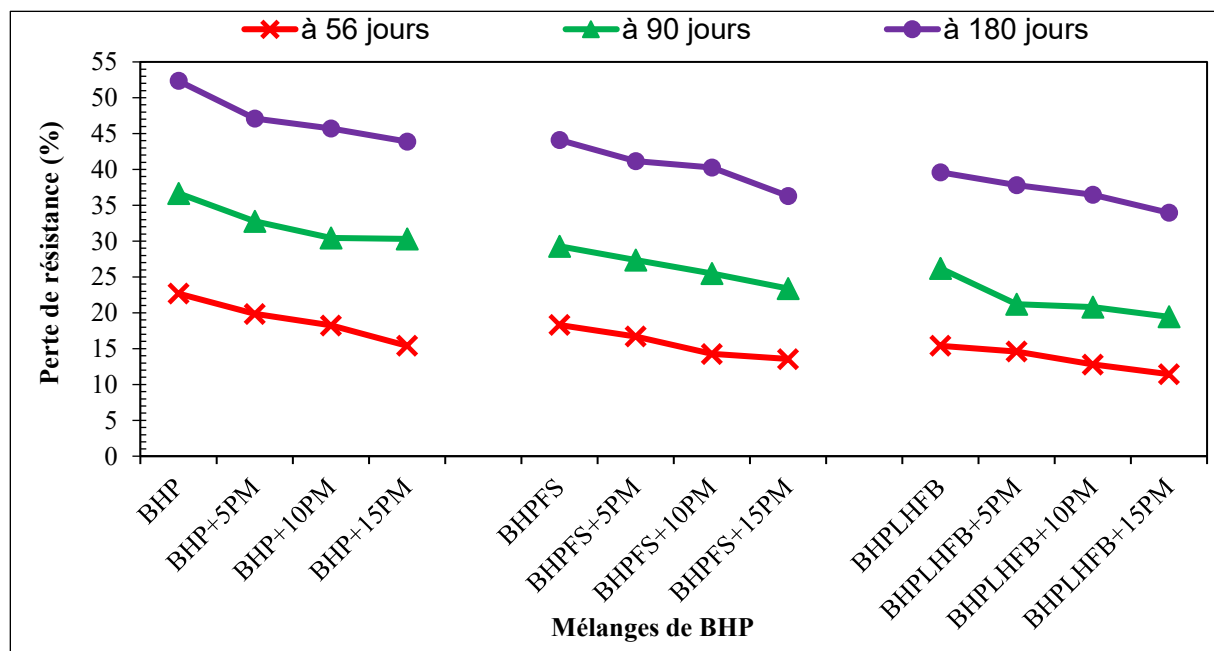
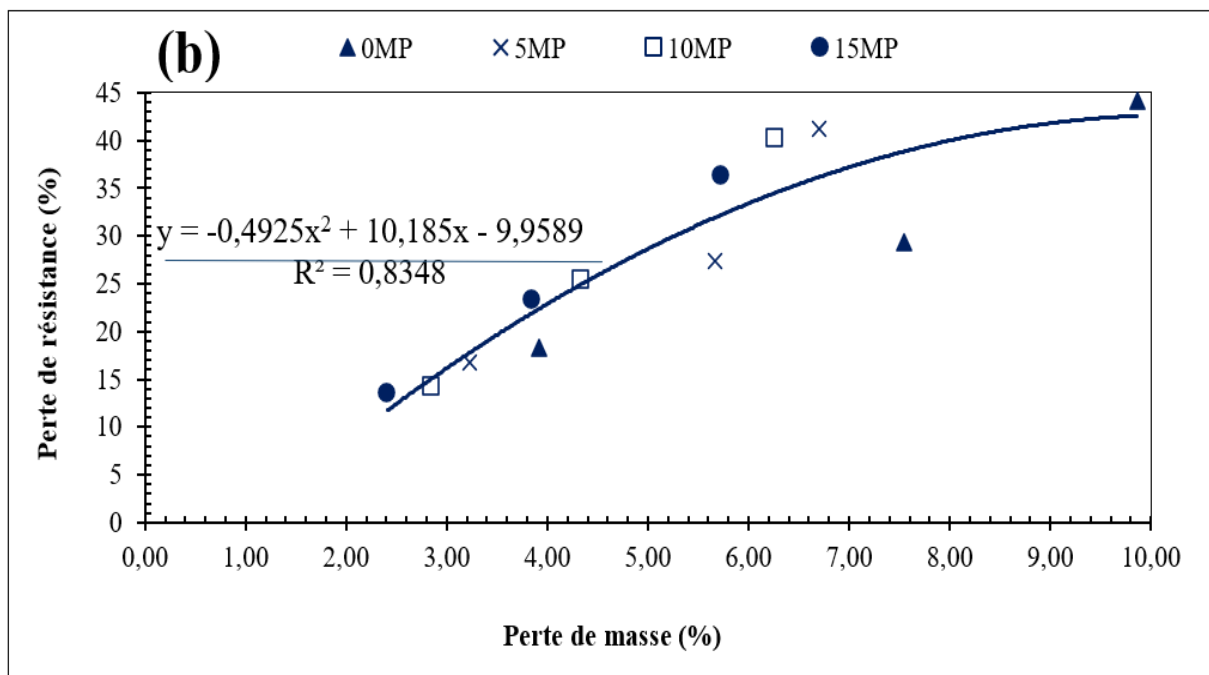
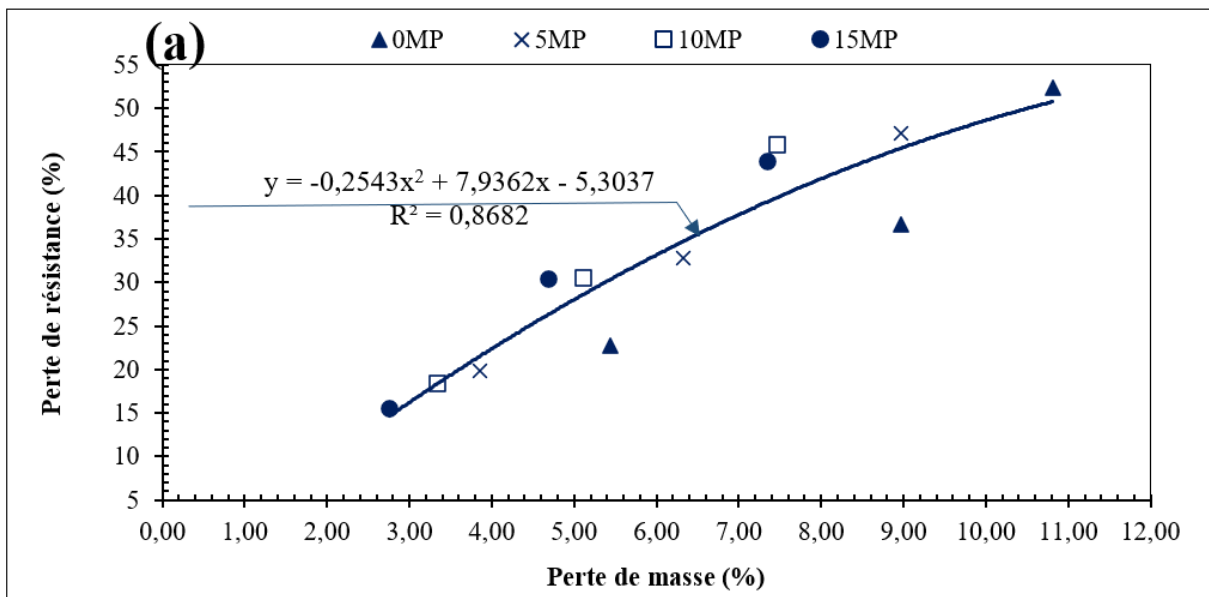


Tableau 4.4 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H₂SO₄) des mélanges de BHP

La Figure 4.5 présente la corrélation entre la perte de résistance et la perte de masse après 56 jours, 90 jours et 180 jours de stockage pour tous les mélanges de BHP soumis à l'attaque par l'acide sulfurique. Cette figure met en évidence une relation polynomiale robuste entre la perte de résistance et la perte de masse pour tous les mélanges de BHP, caractérisée par des coefficients de corrélation élevés : R^2 de 0,86 pour HPC+MP%, 0,83 pour HPCSF+MP% et 0,88 pour HPCGBFS+MP%. Cette forte corrélation est probablement due à l'interdépendance substantielle entre la résistance et la perte de masse, influencée par des paramètres communs qui affectent ces deux propriétés.



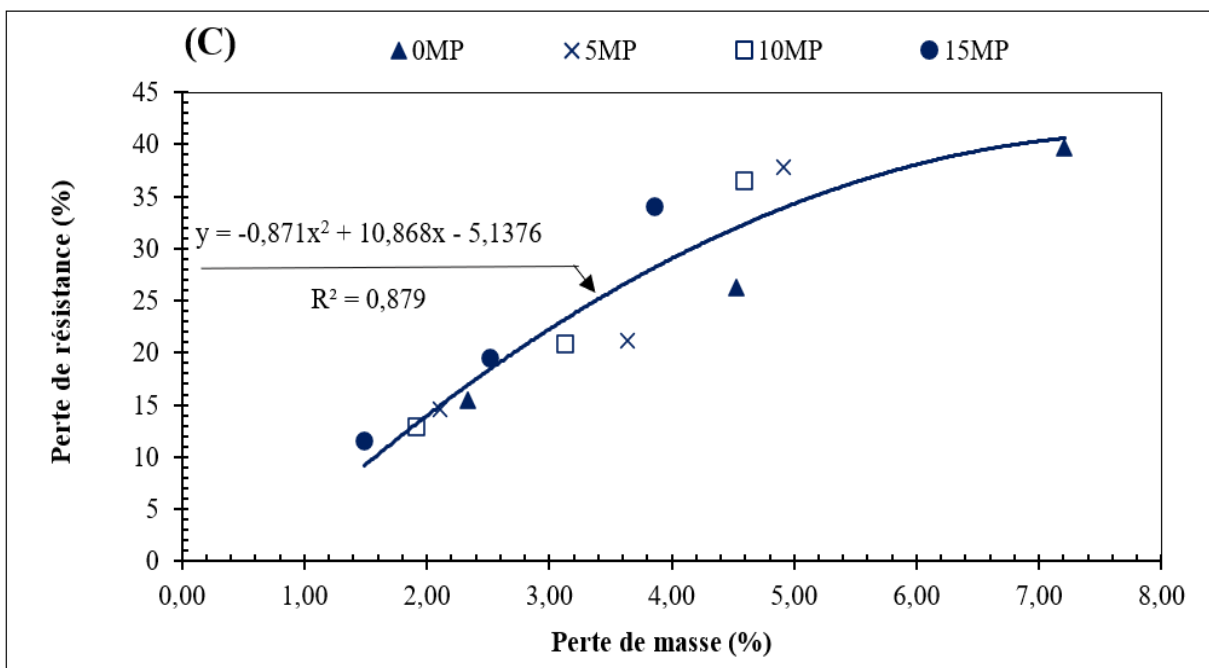


Figure 4.5 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans H₂SO₄ pour : (a) BHP+PM% ; (b) BHPFS+PM% ; (c) BHPLHFB+PM%

4.2.3.2. Résistance à l'attaque par l'acide hydrochlorique

Tableau 4.3 Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCl des mélanges de BHP

Age (Jours)	PM (%)	Perte de masse (%)		
		BHP + % PM	BHPFS + % PM	BHPLHFB + % PM
à 56 Jours	0	3.11	2.38	1.87
	5	2.21	1.96	1.69
	10	1.91	1.73	1.54
	15	1.58	1.46	1.19
à 90 Jours	0	5.1	4.58	3.6
	5	3.6	3.42	2.91
	10	2.91	2.61	2.48
	15	2.67	2.32	2
à 180 Jours	0	6.11	5.91	5.68
	5	5.07	4.01	3.87
	10	4.22	3.75	3.62
	15	4.16	3.43	3.04

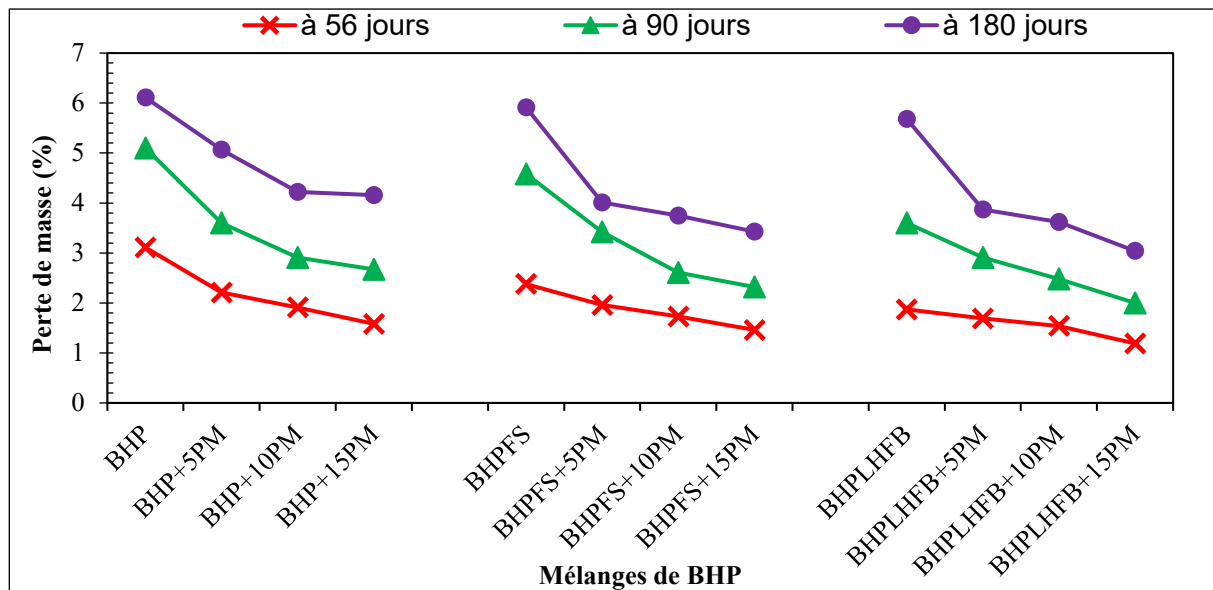


Figure 4.6 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCl des mélanges de BHP

Le Tableau 4.3 et la figure 4.6 montrent la variation de la perte de masse en fonction du temps pour tous les mélanges de BHP immergés dans une solution HCl à 5 % pendant 56, 90 et 180 jours. Les résultats obtenus révèlent qu'après 180 jours de stockage, on observe une augmentation de la perte de masse de 6,11 %, 5,91 % et 5,68 % pour le BHP, le BHPFS et le BHPLHFB, respectivement. Notamment, les formulations de BHP incorporant 8 % de LHFB et de FS en remplacements partiels du ciment présentent une résistance accrue aux effets de HCl par rapport au béton témoin. Cette durabilité améliorée peut être attribuée à l'effet de micro-remplissage du LHFB et de la FS au sein des granulats de béton, résultant en un béton plus dense qui réduit la susceptibilité à la dégradation causée par les attaques de chlorure. (Ahmed et al 2022) ont également observé cet effet lors de l'utilisation de LHFB comme substitut de ciment dans le béton.

À mesure que le pourcentage de remplacement de MP augmente de 0 % à 15 %, la perte de masse diminue de 36,36 %, 38,65 % et 49,20 % pour le BHP ; 44,44 %, 49,34 % et 47,65 % pour le BHPFS ; et 46,48 %, 41,96 % et 31,91 % pour le BHPLHFB respectivement à 56 jours, 90 jours et 180 jours de stockage. Cette diminution de la perte de masse peut être attribuée à la teneur élevée en CaO dans la PM, qui améliore la résistance initiale. Lors du malaxage du béton, des réactions accélérées de nombreux hydrates de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec la réaction pouzzolanique du PM ainsi que du silicate de calcium hydraté (C-S-H). Ces réactions remplissent les pores du béton, renforçant ainsi la matrice et lui conférant une plus grande rigidité. Cette action entrave l'absorption d'eau par le béton (Laoufi et al. 2016).

Comme le montrent le Tableau 4.4 et la figure 4.7, la réduction de la résistance est nettement plus prononcée dans le BHP témoin, avec une perte de résistance croissante observée au fil de la période d'immersion pour toutes les formulations. À noter qu'à 180 jours, la perte de résistance dans les mélanges incorporant du FS et du LHFB est nettement plus faible, à 33,42 % et 27,9 % respectivement, par rapport au BHP témoin qui connaît une perte de résistance dépassant 41 %. Cette différence peut être attribuée à la réactivité pouzzolanique et aux effets de micro-remplissage du SF et du LHFB, qui réduisent efficacement la pénétration des chlorures dans le béton (Kansal et al. 2021 ; Ahmad et al. 2022). Avec l'inclusion de PM jusqu'à 15 % dans les mélanges de BHP, la perte de résistance diminue de 16,20 % pour le BHP, de 18,95 % pour le BHPFS et de 14,30 % pour le BHPLHFB après 180 jours d'immersion. Cette tendance est conforme aux conclusions de (Karkurt et Dumangoz 2022). La présence de PM dans les mélanges de BHP contribue à modifier la structure des pores, ce qui explique ces améliorations dans la rétention de la résistance.

Tableau 4.4. Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide hydrochlorique (HCl) des mélanges de BHP

Age (Jours)	PM (%)	Perte de résistance (%)		
		BHP + % PM	BHPFS + % PM	BHPLHFB + % PM
à 56 Jours	0	18.15	14.08	11.01
	5	15.88	12.84	10.44
	10	14.6	11.26	9.14
	15	12.32	10.43	8.17
à 90 Jours	0	29.11	22.35	18.58
	5	26.02	20.88	15.55
	10	24.15	19.44	14.75
	15	24.07	17.25	13.79
à 180 Jours	0	41.22	33.42	27.9
	5	37.12	31.19	26.44
	10	36.27	30.5	25.68
	15	34.54	27.51	23.91

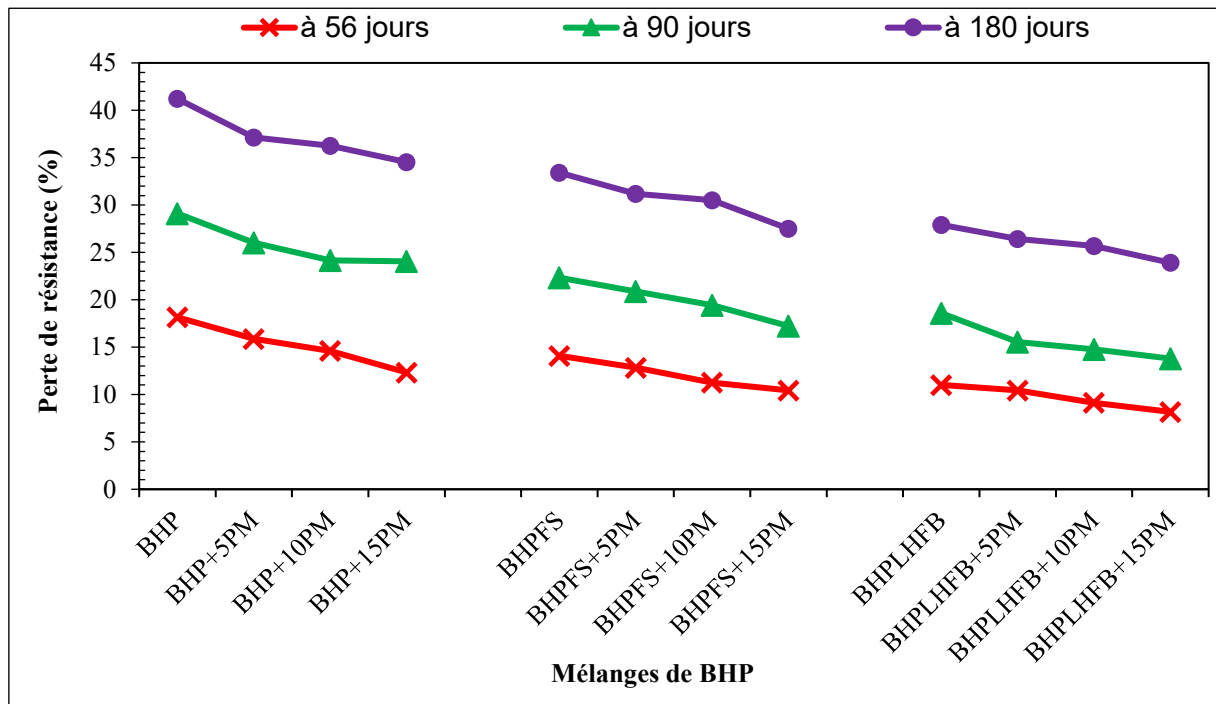
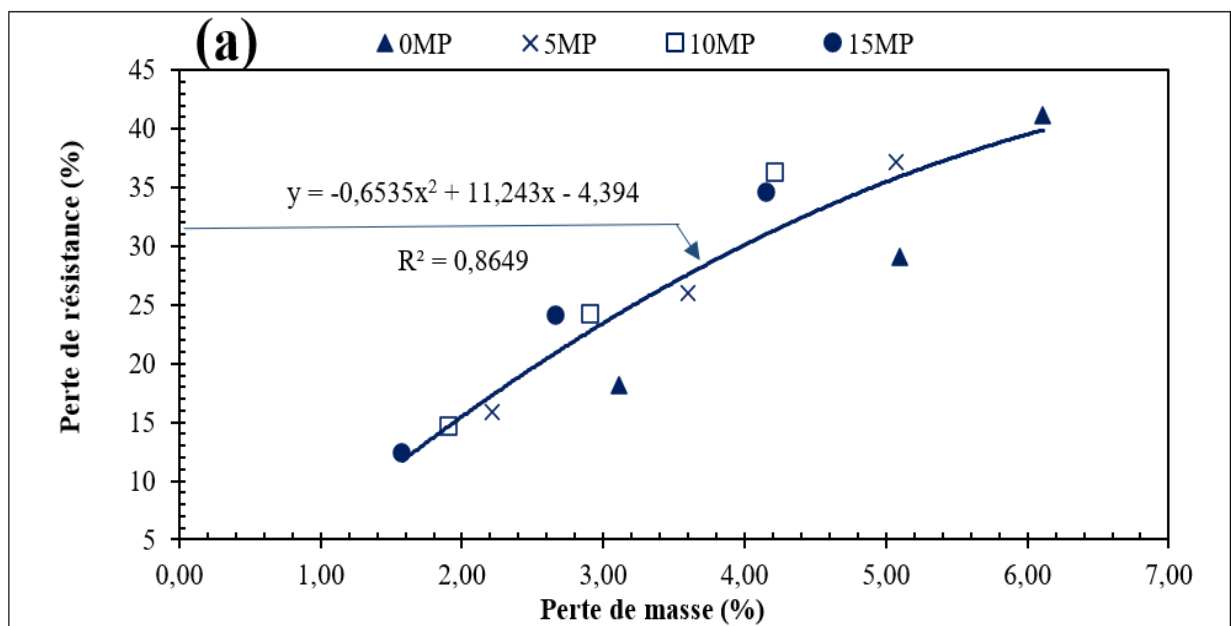


Figure 4.7. Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide hydrochlorique (HCl) des mélanges de BHP

Figure 4.8 montre la relation entre la perte de résistance et la perte de masse à 56 jours, 90 jours et 180 jours de stockage pour tous les mélanges de béton exposés à l'attaque par les chlorures. La figure 4.8 démontre une relation polynomiale robuste entre la perte de résistance et la perte de masse pour tous les mélanges de BHP, caractérisée par des coefficients de corrélation favorables : R^2 égal à 0,86 pour BHP+MP%, et 0,83 pour HBHPFS+MP% et 0,87 BHPLHFB+MP%. Cette forte corrélation est probablement le résultat de l'interdépendance substantielle entre la résistance et la perte de masse, influencée par des paramètres communs qui influent sur les deux propriétés.



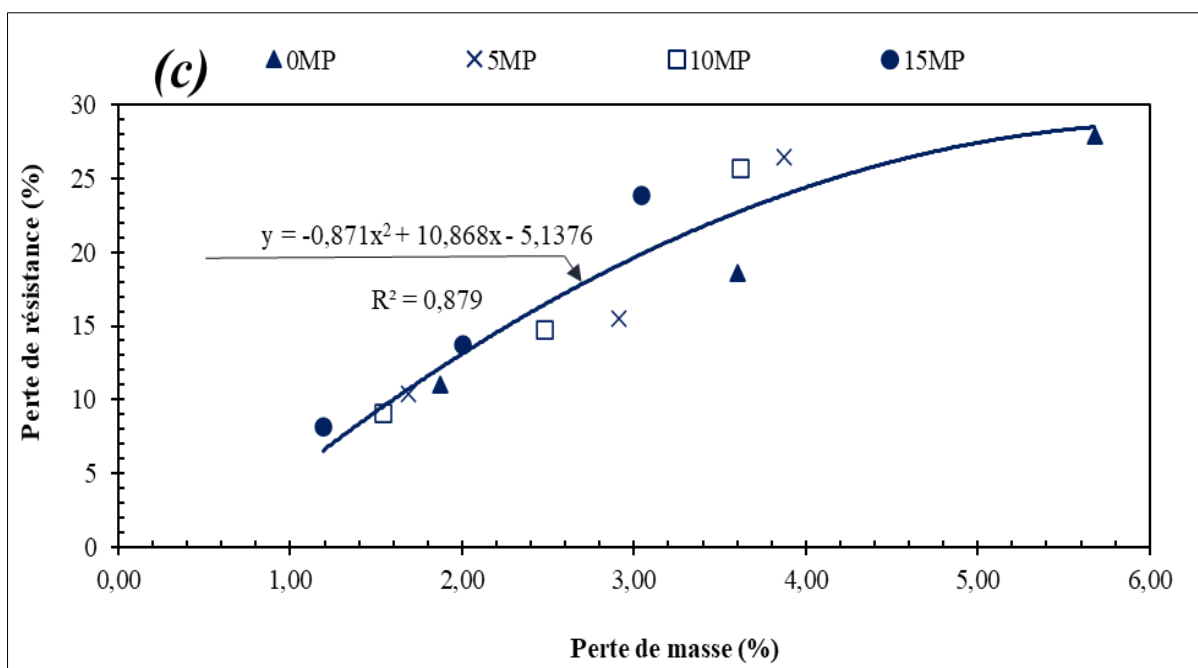
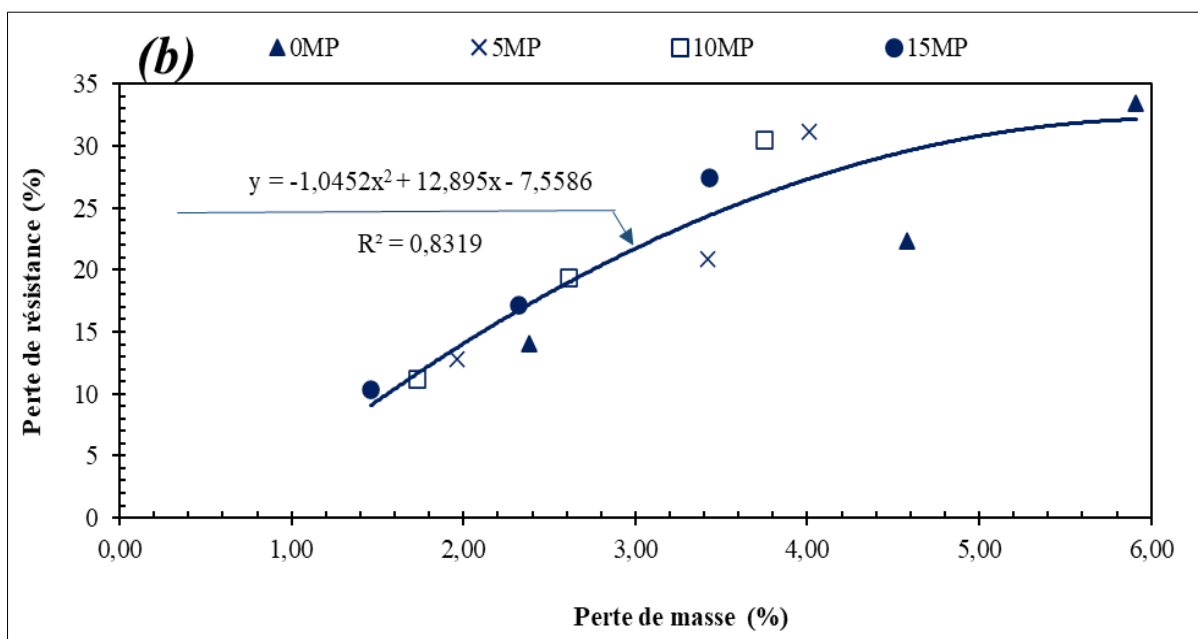


Figure 4.8. Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans HCl pour : (a) BHP+PM% ; (b) BHPFS+PM% ; (c) BHPLHFB+PM%

4.3. BHP à base de SM avec la FS ou LHFB

4.3.1 Absorption d'eau par immersion

Les valeurs d'absorption d'eau par immersion des mélanges de BHP sont présentées dans la Figure 4.9

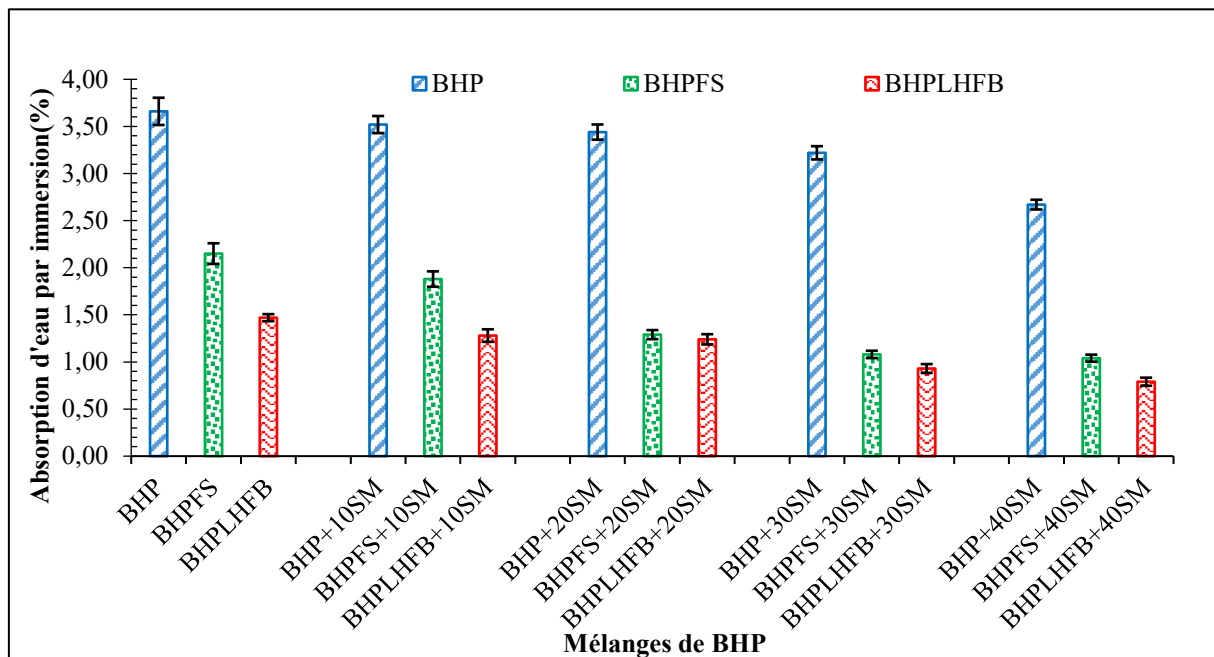


Figure 4.9: Absorption d'eau par immersion des mélanges de BHP.

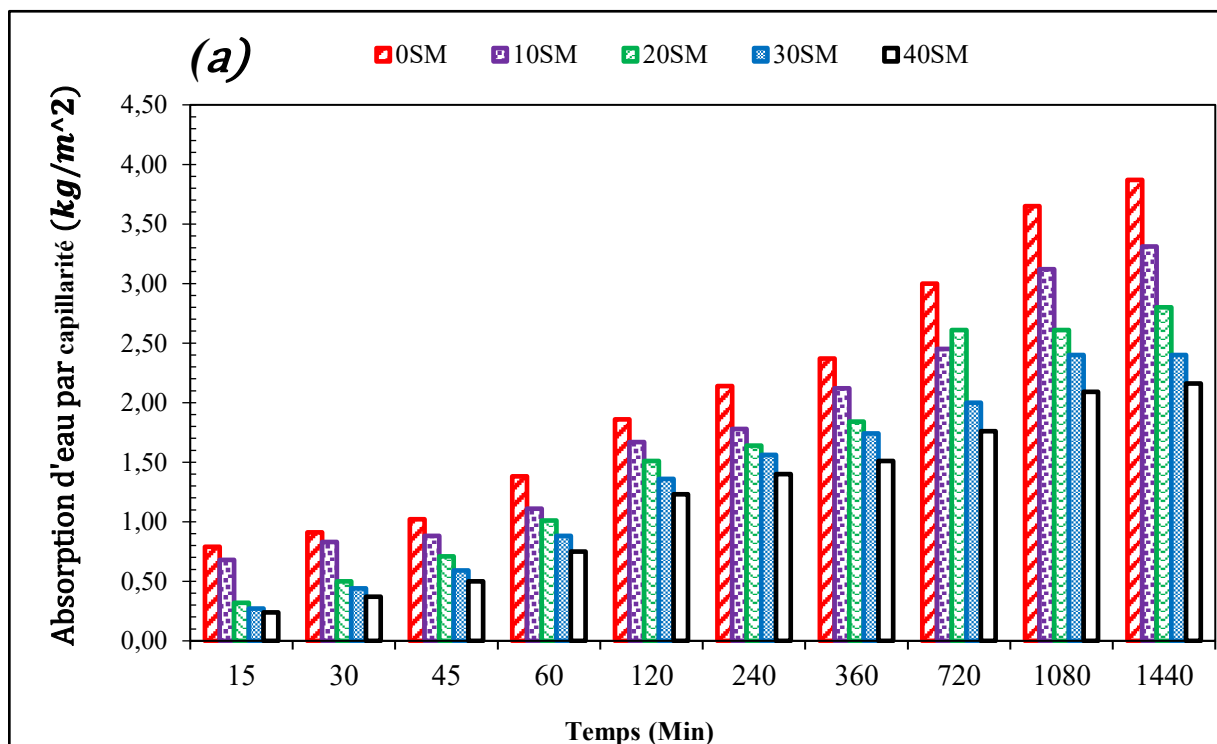
Comme on peut le constater, les valeurs d'absorption d'eau de tous les BHP contenant du SM sont inférieures à celles des BHP sans SM. Les valeurs d'absorption d'eau montrent une diminution progressive avec l'augmentation de la teneur en sable de marbre. L'utilisation de 40% de SM entraîne une diminution de l'absorption d'eau des mélanges de 27,04%, 51,63% et 46,25% respectivement pour le BHP contenant du ciment Portland, du FS et du LHFB. (Gameiro et al. 2014) ont montré une réduction des valeurs d'absorption d'eau de 17,80% lorsqu'on utilise 20% de SM comme sable. (Vardhan et al. 2019a) ont constaté qu'avec 40% de SM, l'absorption d'eau du béton diminuait de 25,68%. Ils ont attribué cette diminution à l'affinement de la ZI granulats-liant grâce à l'effet de remplissage, que le SM exerce. De plus, les BHP contenant du FS et du LHFB présentent des valeurs d'absorption d'eau plus faibles par rapport aux BHP avec du ciment Portland. Sans SM, l'absorption d'eau est réduite de 3,66 à 2,15 et 1,47% lors de l'introduction respectivement de FS et de LHFB. Cette tendance s'explique par l'amélioration de la compacité et des propriétés de transport, ce qui se reflète positivement sur la capacité du BHP à absorber l'eau.

4.3.2. Absorption d'eau par capillarité

Comme le montre la figure 4.10, les résultats obtenus indiquent que l'ajout de FS en tant que substitut partiel du ciment entraîne une diminution de l'absorption d'eau par capillarité de 15,50% après 24 heures par rapport au BHP témoin. Cette réduction est principalement due à l'effet de micro-remplissage de la FS, mettant en évidence ses bonnes caractéristiques de durabilité (Nadh et al. 2021). L'ajout de LHFB au BHP entraîne quant à lui une diminution de

l'absorption d'eau par capillarité de 29,71% après 24 heures. Cette réduction peut être attribuée à la réaction pouzzolanique avec des matériaux cimentaires secondaires Ca(OH)_2 , améliorant les propriétés de liaison du mortier, et à l'effet de micro-remplissage du LHFB, qui comble les vides dans le granulat, conduisant à une masse plus compacte et à une perméabilité plus faible (Ahmad et al. 2022).

L'utilisation de SM dans des proportions allant de 10% à 40% entraîne une diminution de l'absorption d'eau par capillarité de 14,47% à 44,19% pour HPC+SM%, de 11,01% à 30,27% pour BHPFS+SM%, et de 10,29% à 47,06% pour HBHPLHFB+SM% après 24 heures, indiquant une durabilité accrue. Cette observation est corroborée par (Topçu et al. 2008). La présence de SM dans le béton améliore la liaison entre la pâte de ciment et les sables en raison de sa géométrie angulaire et allongée (Gameiro et al. 2014). De plus, les grains de SM remplissent efficacement les pores du béton, donnant ainsi des vaisseaux capillaires plus minces. De plus, l'activité pouzzolanique, probablement due à la réaction entre SiO_2 et Al_2O_3 avec le Ca(OH)_2 , produit des phases supplémentaires de C-S-H et de mono-sulfate, entre autres (Farhina et al. 2015 ; Silva et al. 2009 ; Vieira et al. 2016).



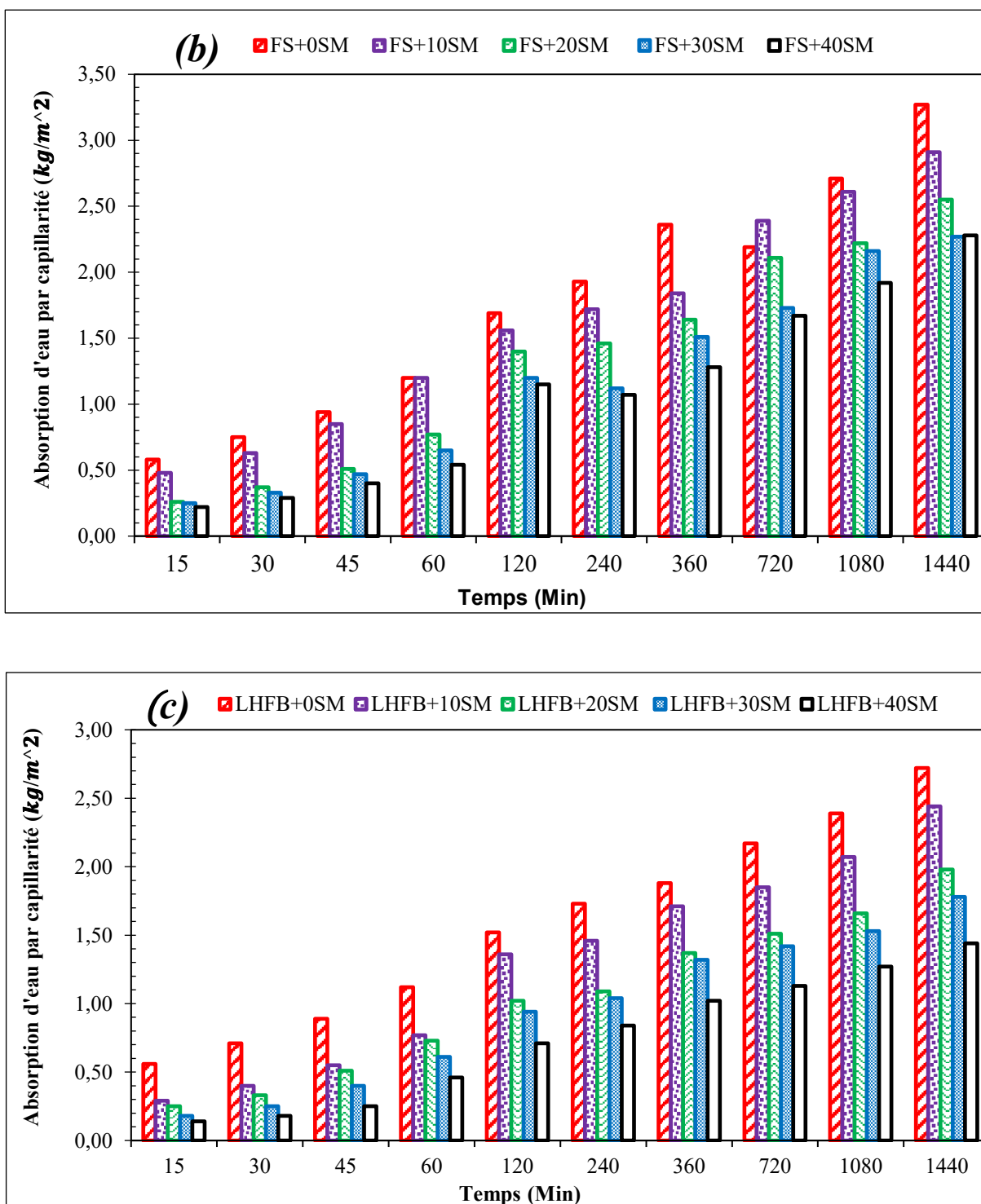


Figure 4.10 : Absorption d'eau par capillarité des mélanges de BHP en fonction du temps pour : (a) BHP+SM% ; (b) BHPFS+SM% ; (c) BHPLHFB+SM%

4.3.3. Attaques chimiques

Les essais d'attaque chimique permettent d'évaluer la capacité des mélanges de BHP à résister à leur détérioration et à la formation de fissures lorsqu'ils sont exposés à des milieux agressifs, constituant ainsi des conditions sévères. La résistance des mélanges de BHP est

évaluée en mesurant la perte de masse et de résistance à la compression après l'attaque chimique.

4.3.3.1. Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique

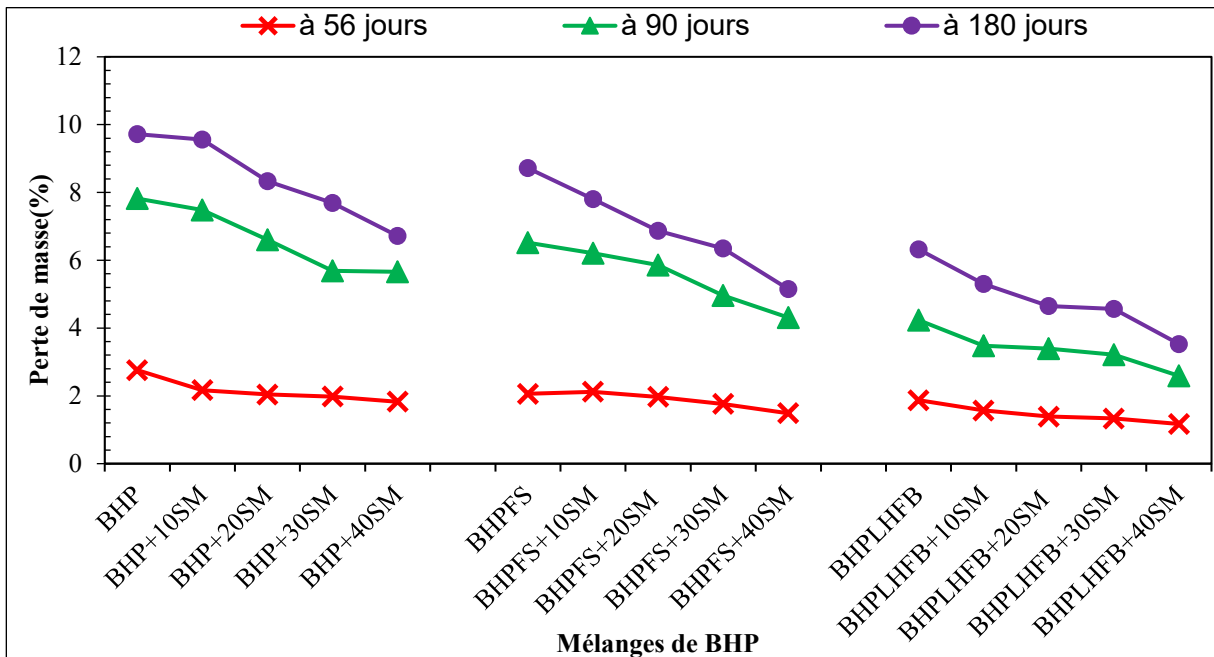


Figure 4.11 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H_2SO_4) des mélanges de BHP

Les figures 4.11 et 4.12 présentent la perte de masse et la perte de résistance de tous les mélanges de BHP immergés dans une solution d'acide sulfurique à 5 % pendant 56, 90 et 180 jours. Tous les mélanges de BHP présentent une perte de masse et de résistance après exposition à un milieu d'acide sulfurique. Cette perte augmente avec la durée d'exposition. La perte de masse ainsi que la perte de résistance diminuent avec l'augmentation du SM. Avec 40 % de SM, la perte de masse à 180 jours est réduite de 26,31 %, 44,44 % et 46,15 %, tandis que la perte de résistance est réduite de 13,04 %, 15,38 % et 16,66 % pour le BHP contenant du CPO, FS et LHFB respectivement. L'effet bénéfique du SM sur la résistance du béton à l'attaque par l'acide sulfurique s'explique par le fait que les fines contenues dans le SM jouent un rôle de remplissage, ce qui améliore la compacité du béton. On observe également que la diminution de la perte de masse ainsi que de la résistance est plus prononcée lorsque la FS et le LHFB sont utilisés comme substitution du ciment. Les mélanges de BHP contenant du LHFB se révèlent plus résistants que les autres mélanges de BHP. Sans SM, la perte de masse à 180 jours diminue de 10,52 % et 31,57 % lorsque la FS et le LHFB sont utilisés respectivement comme substitution du ciment. Cette diminution est attribuée à deux facteurs : 1) la consommation de la portlandite de ciment (C-H), considérée comme très vulnérable à l'attaque par l'acide sulfurique ; 2) la

densification des mélanges de BHP et l'amélioration de l'adhérence à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment.

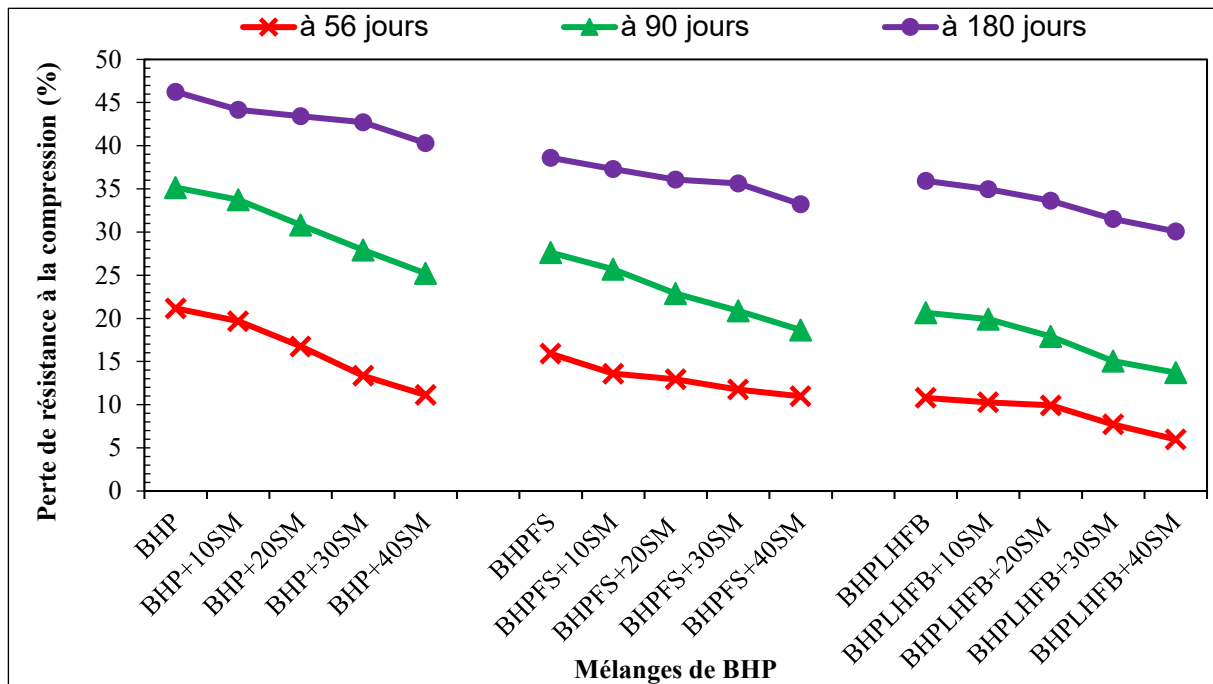
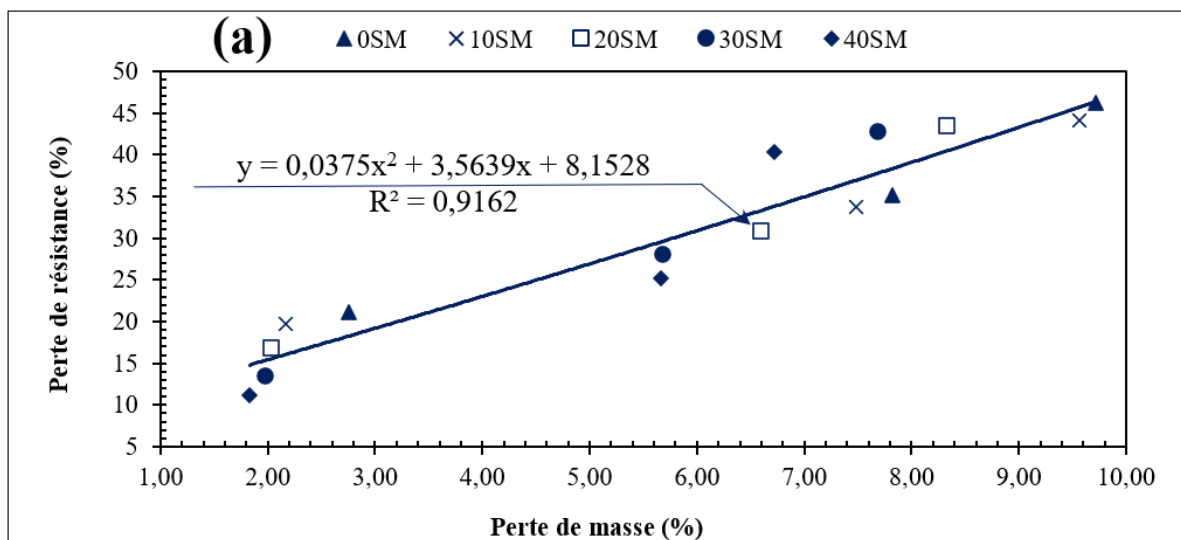


Figure 4.12 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide sulfurique (H_2SO_4) des mélanges de BHP

Une relation polynomiale entre la perte de résistance et la perte de masse pour tous les mélanges de BHP soumis au test de l'acide sulfurique après 56, 90 et 180 jours d'immersion a été illustrée dans la figure 4.13. Il est clair qu'il existe une bonne relation polynomiale entre la perte de résistance et la perte de masse pour tous les mélanges de BHP. Cela montre que la perte de résistance est étroitement liée à la perte de masse. Par conséquent, le coefficient de corrélation R^2 plus élevé confirme que les propriétés sont liées, c'est-à-dire que les spécimens ayant moins de perte de masse ont également moins de perte de résistance.



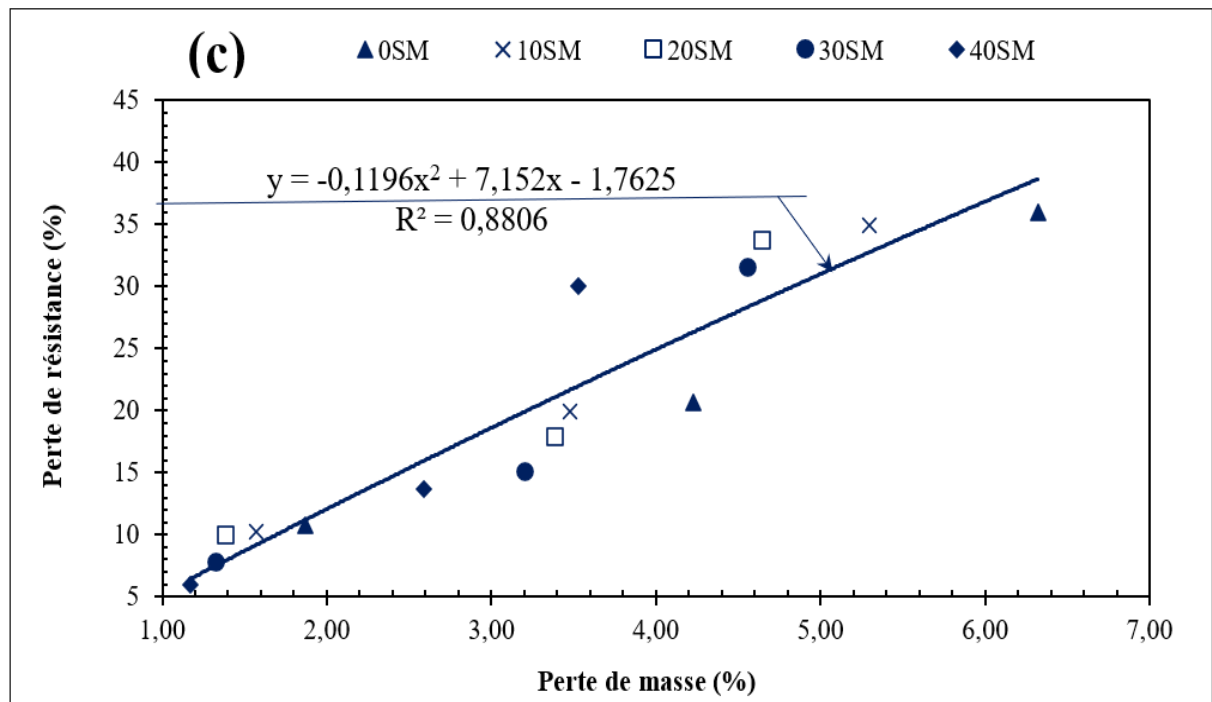
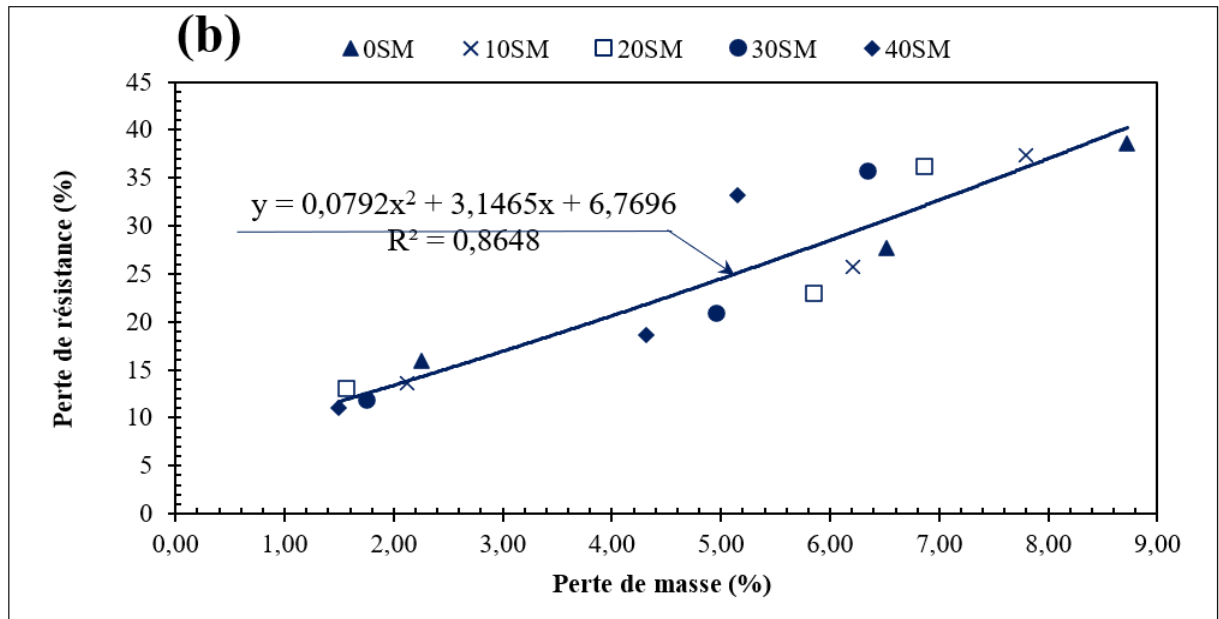


Figure 4.13 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans H_2SO_4 pour : (a) BHP+SM% ; (b) BHPFS+SM% ; (c) BHPLHFB+SM%

4.3.3.2. Résistance à l'attaque par l'acide hydrochlorique

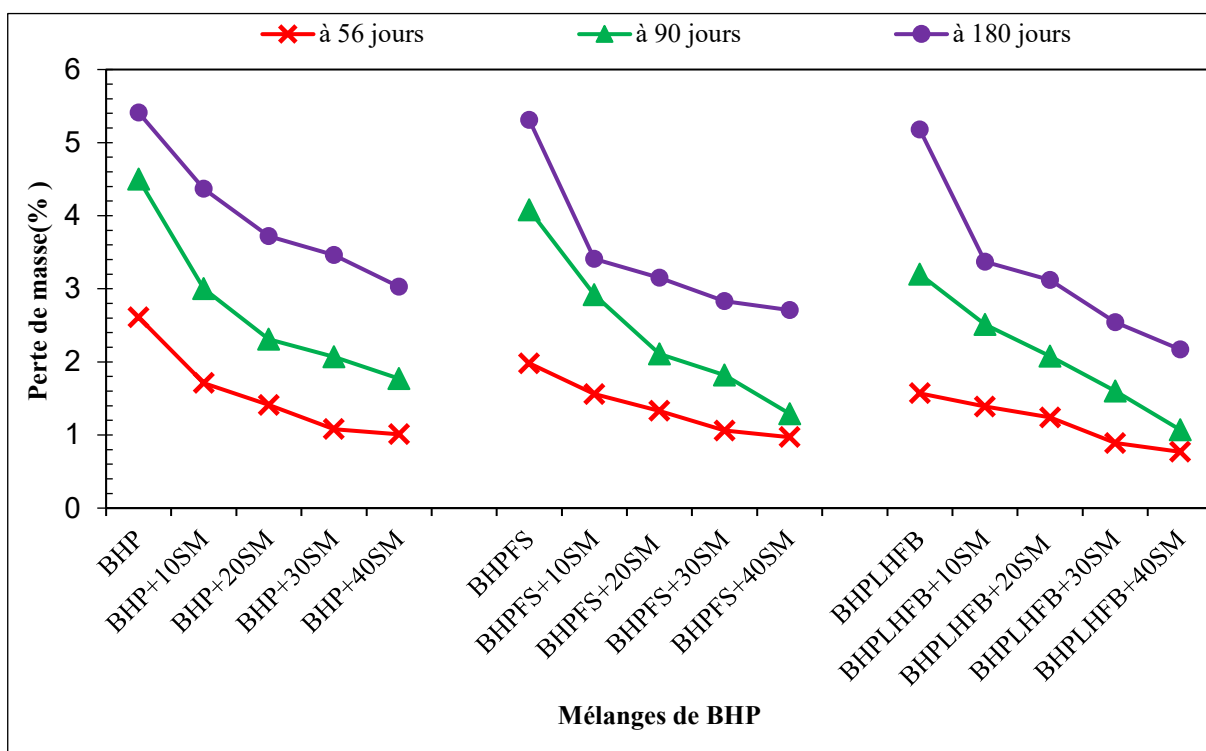


Figure 4.14 : Variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCl des mélanges de BHP

Les figures 4.14 et 4.15 montrent la variation de la perte de masse et de la résistance à la compression pour tous les mélanges de BHP immergés dans une solution d'acide chlorhydrique (concentration de 5 %) pendant 56, 90 et 180 jours. Tous les mélanges de BHP présentent une tendance similaire à celle de l'attaque par l'acide sulfurique. Les plus fortes pertes de masse ainsi que de résistance sont observées pour les mélanges de BHP sans SM. À 180 jours, les mélanges BHP, BHPFS et BHPLHFB présentent une perte de masse de 5,41 %, 5,31 % et 5,18 %, et une perte de résistance de 37,22 %, 30,72 % et 25,5 % respectivement. Il est également démontré que l'introduction de SM dans la composition du BHP a un effet bénéfique sur la résistance des mélanges de BHP. En effet, tous les mélanges de BHP contenant du SM montrent une augmentation progressive de la résistance avec l'augmentation de la teneur en SM. Une perte minimale de masse ainsi que de résistance est observée lorsque 40 % de SM est utilisé. À 180 jours, le mélange BHPLHFB présente les pertes minimales de 2,17 % et 20,66 % pour la masse et la résistance respectivement. Des tendances similaires ont été observées par (Binici et al 2008, Gameiro et al 2014, Vardhan et al 2019a) et ont été expliquées par l'amélioration de la compacité du béton en présence de SM, ce qui rend la pénétration des ions plus difficile.

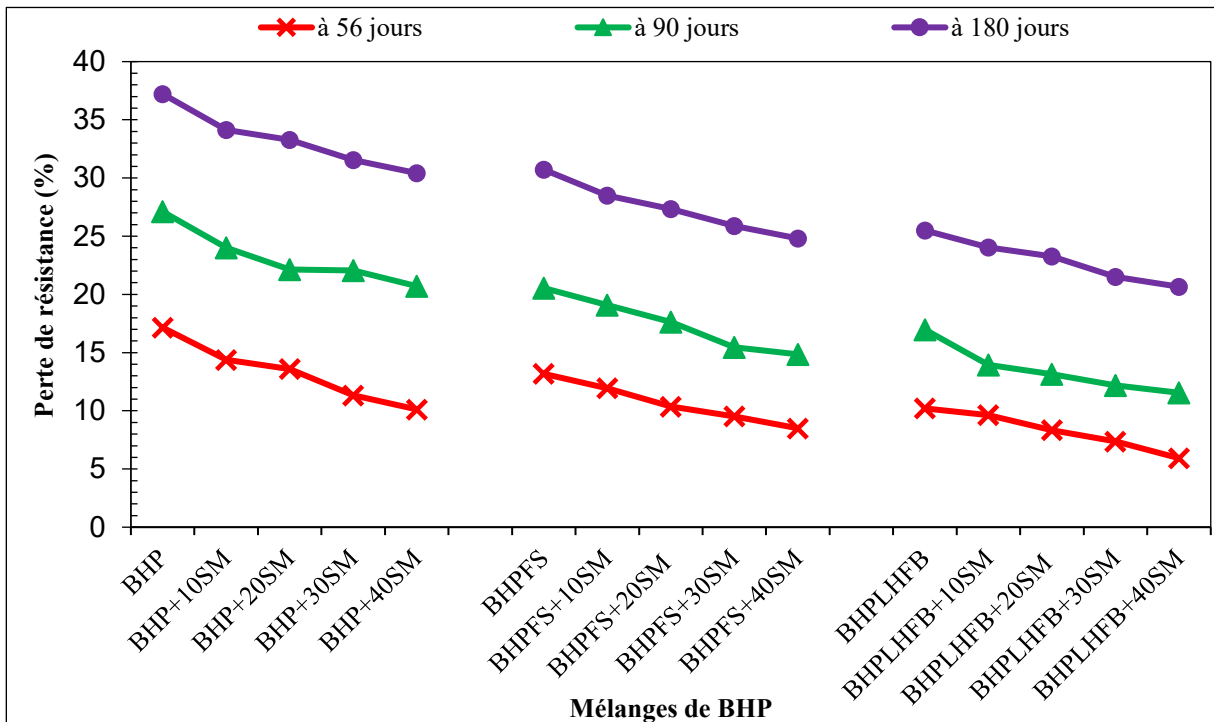
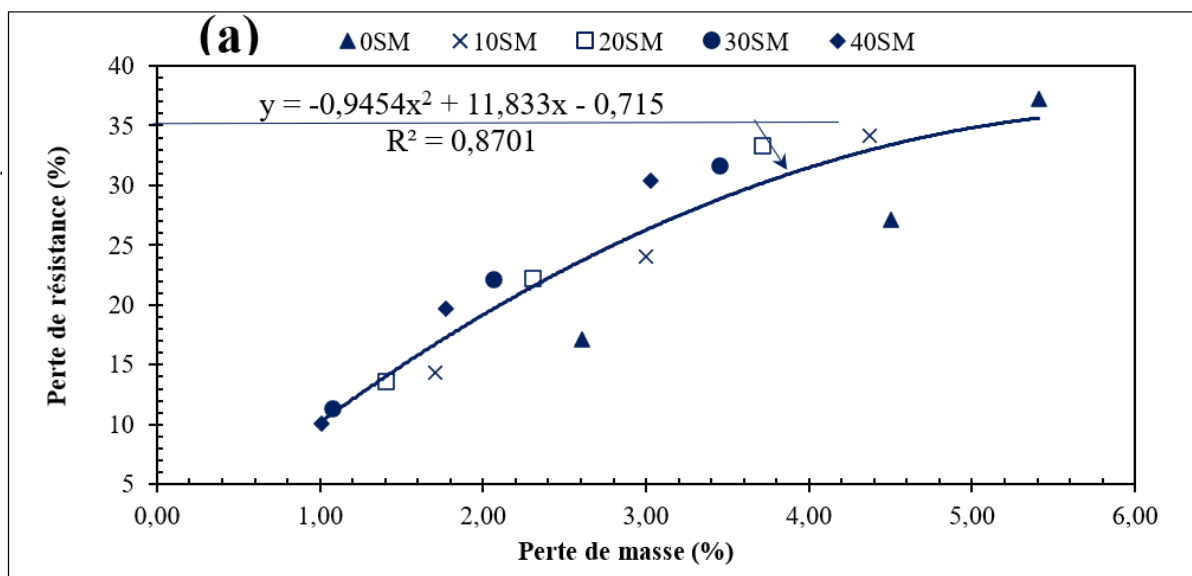


Figure 4.15 : Variation de la perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans l'acide chlorhydrique (HCl) des mélanges de BHP

Figure 4.16 présente la relation entre la perte de résistance et la perte de masse après 56 jours, 90 jours et 180 jours de stockage pour tous les mélanges de BHP soumis à une attaque par les chlorures. Comme indiqué, il existe une bonne relation polynomiale entre la perte de résistance et la perte de masse pour tous les mélanges de BHP, avec un bon coefficient de corrélation R^2 égal à 0,87 pour BHP+SM% et 0,83 pour BHPFS+SM% et BHPLHFB+SM%. Cette bonne corrélation est probablement attribuée à la forte dépendance entre la variation de résistance et la masse, influencées par les mêmes paramètres.



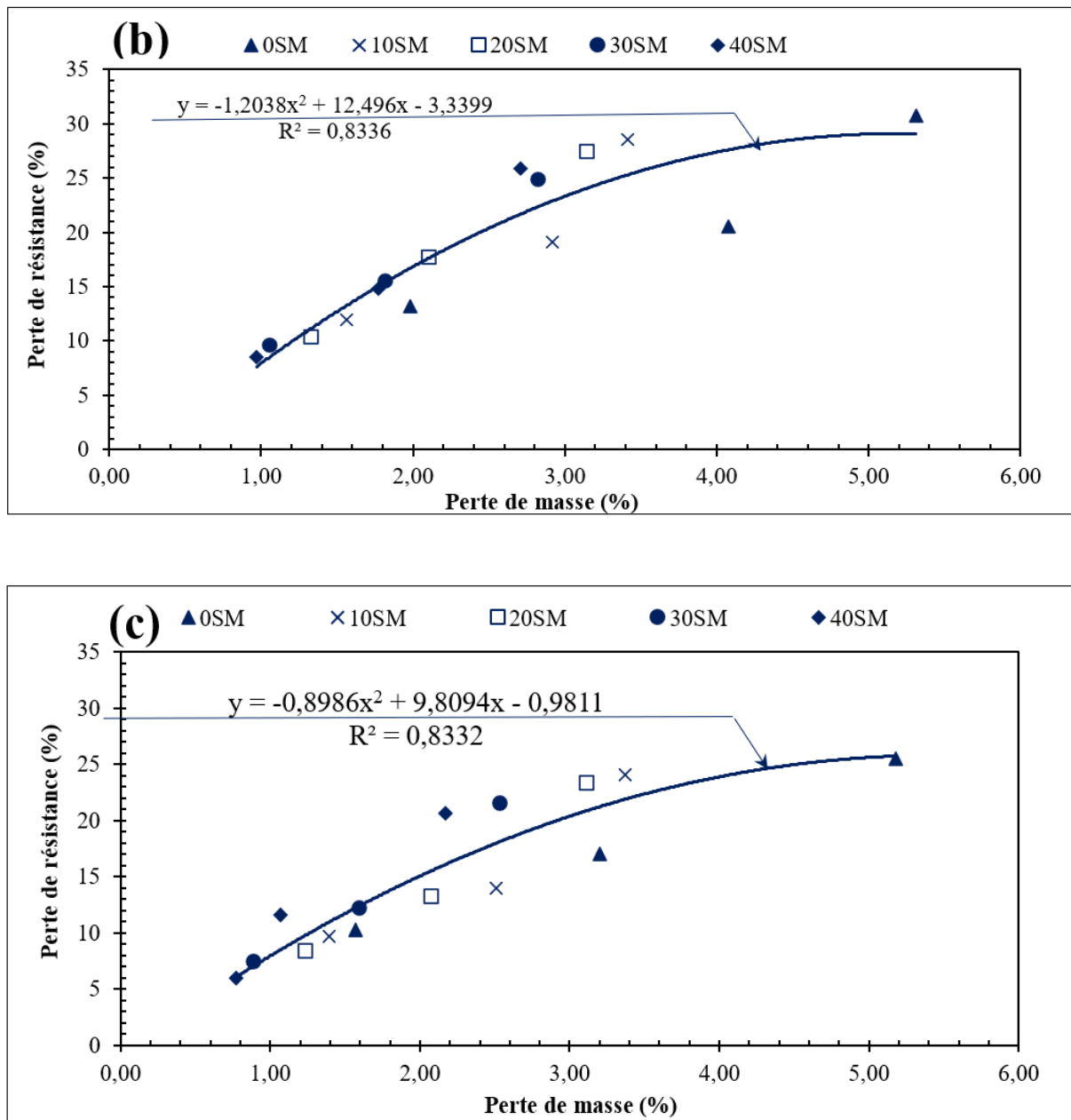


Figure 4.16 : Relation entre la perte de résistance et la perte de masse des mélanges de BHP immergés dans HCl pour : (a) BHP+SM% ; (b) BHPFS+SM% ; (c) BHPLHFB+SM%

L'évaluation de la durabilité des BHP à base de PM par rapport à ceux à base de SM se réalise en comparant les taux de diminution et d'augmentation de propriétés suivantes au fil du temps :

- Une diminution de l'absorption d'eau allant jusqu'à 48,03 % et 51,62 % a été observée pour les mélanges de BHP contenant respectivement 15 % de PM et 40 % de SM.
- Les BHP contenant 15 % de PM ou 40 % de SM présentent une réduction de perte de poids plus de 46% après 180 jours d'immersion dans H₂SO₄. Cette réduction augmente à 49,20% pour les BHP à base de 15% de PM et à 58,11% pour ceux à base de 40% de SM lorsqu'ils sont immergés dans HCl.

- La perte de résistance diminue respectivement après 180 jours d'immersion dans H_2SO_4 et HCl de 17,68% et 18,95% pour les BHP à base de 15%PM et de 16,56% et 19,24% pour ceux à base de 40%SM.

Ces résultats suggèrent que l'incorporation de 15 % de PM ou de 40 % de SM en remplacement du sable améliore la durabilité des BHP d'une manière similaire. Cette amélioration est observée par une réduction significative de l'absorption d'eau et une diminution de la perte de résistance lors de l'immersion dans H_2SO_4 et HCl. Cependant, il semble que 40 % de SM offre une performance légèrement supérieure en termes de perte de masse et de résistance à l'acide par rapport au 15 % de PM.

4.4. Conclusion

Après avoir examiné les résultats des BHP conservés dans l'eau et dans des environnements agressifs, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- L'absorption d'eau a diminué à mesure que le taux de remplacement de PM augmentait de 0 à 15% dans tous les mélanges de BHP à base de PM. Alors que l'inclusion de FS a entraîné une baisse de l'absorption d'eau, la réduction a été plus prononcée lorsque le LHFB a été incorporé.
- Les BHP intégrant 15% de PM et du LHFB ont présenté une résistance accrue à HCl.
- L'utilisation de SM ainsi que de FS et de LHFB permet d'améliorer la qualité du BHP et de réduire sa capacité à absorber l'eau. Cette réduction est plus significative lorsque la teneur en SM augmente dans la composition du BHP.
- L'utilisation de SM améliore la résistance du BHP aux attaques d'acide sulfurique et d'acide chlorhydrique. Cette augmentation se traduit par une réduction de la perte de masse ainsi que de la résistance. De plus, l'utilisation combinée de ciment avec SF ou LHFB s'avère plus efficace et entraîne une perte minimale de masse ainsi que de résistance.
- Les évaluations de durabilité ont démontré que le BHP produit avec du LHFB surpassait ceux avec du FS et ceux sans ajouts supplémentaires.
- Les échantillons de BHP immergés dans des solutions d'acide sulfurique présentent un impact significatif sur la perte de masse et la réduction de résistance, en comparaison avec ceux immergés dans de l'acide hydrochlorique.

En conclusion, l'efficacité de l'utilisation de DM dans les BHP en ce qui concerne leur durabilité repose sur les résultats de comparaison suivants :

- La réduction de l'absorption d'eau atteint jusqu'à 38,86% pour la méthode utilisant 10% de PM, tandis qu'elle ne dépasse pas 14,47% pour celle utilisant le même taux de SM.
- La méthode utilisant 10 % de PM dans les BHP présente une réduction de perte de poids de plus de 36% après 180 jours d'immersion dans H₂SO₄ et HCl. Cette réduction diminue à 16,14% et à 34,12% pour celle utilisant 10% de SM lorsqu'ils sont immergés dans H₂SO₄ et HCl respectivement.
- La perte de résistance diminue respectivement de 12,66 % et 12 % après 180 jours d'immersion dans H₂SO₄ et HCl pour les BHP de la méthode utilisant 10 % de PM, et de 4,52 % et 8,33 % pour ceux de la méthode utilisant 10 % de SM.

En résumé, en termes de réduction de l'absorption d'eau, de perte de masse et de résistance à H₂SO₄ et HCl, la PM semble offrir une performance supérieure par rapport au SM dans les mélanges de BHP en remplaçant 10 % du sable.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales et perspectives

Le présent travail de recherche s'inscrit dans le contexte de valorisation de DM, combinés avec des sous-produits industriels, tels que la FS et le LHFB, dans la formulation des BHP. L'objectif est d'étudier leurs effets sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et durabilité des BHP dans les milieux agressifs, ainsi que leurs contributions à l'obtention d'autres sources d'approvisionnement en matériaux de construction durable et respectueux de l'environnement. Sur la base des résultats de cette étude de recherche, les conclusions générales qui peuvent être tirées pour les différentes formulations sont énoncées comme suit :

1-Pour les BHP à base de PM :

- Les ajouts de FS et du LHFB contribuent à une réduction de la densité de ces BHP.
- Les mélanges des BHP combinés avec LHFB et PM présentent une résistance à la compression supérieure à celle des autres mélanges BHP, avec une amélioration constatée lorsque la teneur en PM augmente de 0 à 15%.
- De fortes corrélations ont été observées entre la résistance à la compression, la vitesse de l'impulsion ultrasonique et de la densité pour tous les mélanges des BHP, avec des coefficients de corrélation dépassant 0,86.
- L'absorption d'eau diminue à mesure que le taux de remplacement des PM augmente de 5 à 15% dans tous les mélanges. Bien que l'inclusion de FS entraîne une diminution de l'absorption d'eau, la réduction a été plus prononcée lorsque le LHFB a été incorporé.
- L'examen de durabilité montre que le BHP produit avec LHFB surpasse celui produit avec FS et sans aucun ajout supplémentaire.

2-Pour les BHP à base de SM :

- L'ajout du SM à la composition du BHP entraîne une augmentation progressive de l'ouvrabilité.
- Le SM présente une densité spécifique supérieure à celle des autres granulats, ce qui a entraîné une augmentation de la densité fraîche du BHP. Cette augmentation s'accompagne d'une diminution de la teneur en air des BHP, attribuable à la densification des mélanges par l'ajout de SM.

- Les résistances de BHP s'améliorent avec l'introduction du SM, une amélioration plus notable étant observée lorsque la FS ou le LHFB sont utilisés en remplacement du ciment. L'augmentation maximale de la résistance mécanique de 30.98% est obtenue pour des BHP contenant 36 kg de LHFB et 40% de SM.
- L'utilisation du SM ainsi que de FS et de LHFB conduit à une amélioration de la qualité du BHP et réduit sa capacité d'absorption d'eau. Cette diminution est d'autant plus significative que la teneur en SM augmente dans la composition du BHP.
- L'utilisation du SM améliore la résistance du BHP face aux attaques des acides sulfuriques (H_2SO_4) et chlorhydriques (HCl). Cette amélioration se traduit par une réduction de la perte de masse ainsi que de résistance. De plus, l'utilisation combinée du ciment avec FS ou LHFB s'avère plus efficace, entraînant une perte minimale de masse et de résistance.

L'analyse approfondie des comparaisons précédemment effectuées sur l'introduction de DM dans les BHP sous forme de poudre et sable nous permet de déterminer la méthode d'introduction optimale et efficace de DM pour obtenir les meilleures propriétés physiques, mécaniques et de durabilité. En se basant sur les résultats trouvés :

- Il apparaît que l'utilisation de 15 % de PM offre des améliorations des propriétés physiques et mécaniques similaires à celles obtenues avec 40 % de SM. Cependant, les mélanges à base de 40 % de SM présentent légèrement une meilleure durabilité en termes de réduction de la perte de masse et résistance à HCl.
- Pour un remplacement de 10% de sable par PM ou SM dans les mélanges de BHP, les propriétés physiques, mécaniques et de durabilités sont généralement meilleures pour la PM que pour le SM, comme détaillé ci-dessous :
 - ✓ La réduction de l'absorption d'eau est supérieure de 62,76% pour la PM par rapport au SM, tandis que la réduction de la perte de masse et de résistance dans H_2SO_4 est respectivement supérieure de 55,16 % et 64,29% pour la PM par rapport au SM.
 - ✓ L'augmentation de la maniabilité atteint 9,67 % pour la PM, tandis qu'elle est de 7,41 % pour le SM.
 - ✓ Une réduction de la teneur en air de 71,42% pour la PM et de 56,66% pour le SM.
 - ✓ La résistance à la compression augmente de 17,43 % pour la PM, comparativement à 9,88 % pour le SM.

En résumé, les résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité du remplacement unique ou combiné de (FS, LHFB et SM) et (FS, LHFB et PM) dans la technologie du BHP conduisant à une diminution de la consommation de ciment et des émissions de gaz à effet de serre, à une

réduction de l'utilisation granulats naturels et à la création d'un béton vert favorable à l'environnement. L'utilisation simultanée de LHFB et SM ou PM dans la production du BHP présente une résistance mécanique et une durabilité remarquable.

Les recherches effectuées dans le cadre de cette thèse se sont concentrées sur l'exploration des propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et de durabilité des BHP à base de déchets industriels et des matériaux locaux. Cependant, d'autres aspects demeurent encore à approfondir. Ainsi, nous suggérons, pour des travaux futurs, les points suivants :

- Etudier l'influence des ajouts minéraux sur le comportement rhéologique, physico-mécaniques et durabilité des BHP à base de PM en remplaçant du ciment.
- Examiner l'effet de la température à long terme sur le comportement des BHP à base de déchets industriels et de matériaux locaux.
- Analyser le comportement vis-à-vis du retrait et du fluage de ces BHP.
- Etude microscopique des BHP à base de déchets industriels et de matériaux locaux.
- Caractériser la structure des pores du BHP à base de déchets industriels et de matériaux locaux, en déterminant la porosité, la distribution des tailles et la connectivité des canaux poreux.
- Évaluer l'aspect économique et environnemental en réalisant une étude comparative des prix entre les BHP à base de déchets industriels et ceux sans de matériaux supplémentaires.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A, Behnood, H, Ziari (2008), Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, *Cem. Concr. Compos.* 30 106–112.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003>

Afroughsabet, V, Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73–82.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>

Ahmad, J, Kontoleon, K.J, Majdi, A, Naqash, M.T, Deifalla, A.F, Ben Kahla, N, Isleem, H.F, Qaidi, S.M.A (2022). A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. *Sustainability* 14, 8783.

<https://doi.org/10.3390/su14148783>.

Aitcin, P.C, Baron, J et Bournazel, J.P. (1996). Viser une résistance à la compression. les bétons bases et données pour leur formulation (edited by J. Baron and J.P.ollivier), pp277-305. Editions. Eyrolles.Paris.

<http://worldcat.org/isbn/2212013167>

Aitcin, P, (1998) “High Performance Concrete,” First Edition, Spon, Aug..

<https://doi.org/10.4324/9780203475034>

Aitcin.P-C. (1983). Condensed Silica Fume. Québec, Canada : Editions de l'université de Sherbrook. p. 52. ISBN 2-7622-0016-4.

Akbarzadeh Bengar, H, Shahmansouri, A, Akkas Zangebari Sabet, N, Kabirifar, K et W, Y, Tam, V (2020). Impact of elevated temperatures on the structural performance of recycled rubber concrete: Experimental and mathematical modeling. *Construction and Building Materials* 255, 119374.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119374>

Ali, A.A. and Hashmi, S.M. (2014), “An experimental investigation on strengths characteristics of concrete with the partial replacement of cement by marble powder dust and sand by stone dust” , *Int. J. Sci. Res. Dev.*, **02(07)**, 360-368.

Aliabdo, AA, Abd Elmoaty, AEM and Auda, EM (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials* 50, 28-41.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>

André, A, de Brito, J, Rosa, A. and Pedro, D. (2014), “Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste” , *J. Clean. Prod.*, **65**, 389-396.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.037>

Ashish, D.K. (2018), “Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth” , *J. Build. Eng.*, **15**, 236-242.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.024>

- Atahan, A. O et Yücel, A, Ö (2012). Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. *Construction and Building Materials* 36, 617–622.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068>
- Basaran, B, Kalkan, I, Aksoylu, C, Özkılıç, Y,O, Sabri, M,M,S (2022). Effects of Waste Powder, Fine and Coarse Marble Aggregates on Concrete Compressive Strength. *Sustainability* 14, 14388.
<https://doi.org/10.3390/su142114388>
- Belaribi, Hassiba, Mekki Mmellas, (2013). Evaluation of in situ fiber concrete By combination of non-destructive techniques (sclerometer and ultrasound). *Africa Science: International Journal of Science and Technology* 8.3 (2013): 1-13
- Bentz, D. P., Garboczi, E. J., Haecker, C. J., et Jensen, O. M. (1999). Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 29).
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00163-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00163-5)
- Bernard, V.A.R.; Renuka, S.M.; Avudaiappan, S.; Umarani, C.; Amran, M.; Guindos, P.; Fediuk, R.; Ivanovich Vatin, N. (2022). Performance Investigation of the Incorporation of Ground Granulated Blast Furnace Slag with Fly Ash in Autoclaved Aerated Concrete. *Crystals* 12, 1024. <https://doi.org/10.3390/cryst12081024>.
- Binici, B, Kaplan, H and Yilmaz, S (2007). Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Sci. Res. Essays* 2(9), 372-379.
- Binici, B., Shah, T., Aksogan, O. and Kaplan, H. (2008), “Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates” , *J. Mater. Process. Technol.*, 208, 299-308.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.120>
- Boukendakdji, O, Kadri, E,H, Kenai, S (2012). effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cem. Concr. Comp* 34, 583–590.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013>
- Boughamsa, O, Hebhoub, H, Kherref, L, Belachia, M, Abdelouahed, A and Chaher, R (2020). Valorization of marble’s waste as a substitute in sand concrete. *Advances in Concrete Construction* 9, 217-225.
<https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.2.217>
- Bourzik, O, Baba, K, Akkouri, N, Nounah, A., (2023). Effect of waste marble powder on the properties of concrete. *Materials Today: Proceedings* 72, 3265-3269.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.184>
- Chandramouli, K J, Sree Naga Chaitanya, Sk, Bifathima, G., Yaswanth Sai, (2022). Strength Study on Concrete by using Partial Replacement of Silica Fume with Cement and Marble Powder with Fine Aggregate - *IJFMR* 2022. Volume 4, Issue 4, July-August 2022.

Chawla, A, Syed Ahmed Kabeer, KI and Vyas, AK (2018). Evaluation of strength and durability of lean concrete mixes containing marble waste as fine aggregate. *European Journal of Environment and Civil Engineering* 24, 1398-1413.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1471009>

Corinaldesi, V, Donnini, J (2019). Waste rubber aggregates. *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete* 87–119.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00004-X>

Corinaldesi, V., Moriconi, G. and Naik, T.R. (2010), “Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 24, 113-117.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>

Detwiler, G. (1991). *High-strength Silica fume Concrete*. Chicago : Concrete International.

Djebien, R., Belachia, M. and Hebhouh, H. (2015), “Effect of marble waste fines on rheological and hardened properties of sand concrete”, *Struct. Eng. Mech., Int. J*, 53(6), 1241-1251.
<https://doi.org/10.12989/sem.2015.53.6.1241>

Djebien, R, Hebhouh, H, Belachia, M, Berdoudi, S. and Kherraf, L. (2018), “Incorporation of marble waste as sand in formulation of self-compacting concrete” , *Struct. Eng. Mech., Int. J*, 67(1), 87-91.
<https://doi.org/10.12989/sem.2018.67.1.087>

Divsholi, B. S., Lim, T. Y. D., Teng, S. (2014). Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 157–164.
<https://doi.org/10.1007/s40069-013-0063-y>

Dreux, G et Feasta, J (1996). *Nouveau Guide du Béton et de Ses Constituants*. Edition Eyrolles, Paris, France.

Domone, P, et Illston, john. (2010). *Construction Materials Fourth edition (4th ed.)*. Taylor & Francis Group.

Duggal, S. K. (2008). *Building Materials*. In new age international (p) limited.
<https://digitallibrary.mes.ac.in/handle/1/4470>

Ergün, A. (2011), “Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete” , *Constr. Build. Mater*, 25,806-812.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>

Evrarn, A, Akçaoglu, T, Ramyar, K and Çubukçuoglu, B (2020). Effects of waste electronic plastic and marble dust on hardened properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 263, 120928
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120928>

Fagerlund, G. (1998). Inverkan av ballastens mineraliska sammansättning på brottegenskaper hos normalbetong.

Farinha, C, de Brito, J and Veiga, R, (2015). Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. *Const. Build. Mater* 83, 194-206
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.028>

F.K. Kong, R.H. Evans,(2013). Reinforced and prestressed concrete, Springer, 2013.
<https://doi.org/10.1201/9781315274416>

Youssf, O, Mills, JE, Benn, T, Zhuge, Y, MA, X, Roychand, R and Gravina, R.,(2020). Development of Crumb Rubber Concrete for Practical Application in the Residential Construction Sector – Design and Processing. *Construction and Building Materials* 260, 119813.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119813>

Freedman, S, “High Strength Concrete,” ISL-OIT, Portland Cement Association, Skokie,IL, (1971).Furnace Slag, and Marble Powder. *Journal of Applied Engineering Sciences*, VOL. 13(26),.NO. 368, pp. 137-146.
<https://doi.org/10.2478/jaes-2023-0018>

Gameiro, F., de Brito, J. and Correia da Silva, D. (2014), “Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry”, *Eng. Struct*, 59, 654-662.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.026>

Gesoglu, M., Guneyisi, E., Kocabag, M.E., Bayram, V. and Mermerdas, K. (2012), “Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash” , *Constr. Build. Mater*, 37, 160-170.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092>

Gesoglu M, Güneyisi,E, Özbay,E (2009). Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Constr. Build. Mater* 23, 1847–1854.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015>

G.Menendez and al (2003).Strength development of ternary blended cement with limesotone filler and blast furnace slag.*Cement and Concrete Research – Vol 25* , pp 61- 67-2003.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00056-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00056-7)

Goodspeed, C, Vanikar, S, and Cook, R.,(1996)“High-Performance Concrete (HPC) Defined for Highway Structures,” *Concrete International*, V. 18, No. 2, 1996, pp. 62-67.

Han, C.-G., Hwang, Y.-S., Yang, S.-H., Gowripalan, N. (2005). Performance of spalling resistance of high-performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1747–1753.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.013>

Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H. and Ghorbel, E. (2011), “Use of waste marble aggregates in concrete” , *Constr. Build. Mater.*, **25**, 1167-1171.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>

- Huang, W, Huang, X, Xing, Q and Zhou, Z (2020). Strength reduction factor of crumb rubber as fine aggregate replacement in concrete. *Journal of Building Engineering* 32, 101346. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101346>
- Igarashi SI, Watanabe A, Kawamura M (2005). Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages. *Cement and Concrete Research* 35(3),513–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.036>
- Ince, C., Hamza, A., Derogar, S. and Ball, R.J. (2020), “Utilisation of waste marble dust for improved durability and cost efficiency of pozzolanic concrete”, *J. Clean. Prod.*, **270**, 122213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122213>
- Jalal, M, Arabali, P, Grasley, Z, Bullard, JW and Jalal, H (2020). Behavior assessment, regression analysis and support vector machine (SVM) modeling of waste tire rubberized Concrete. *Journal of Cleaner production* 273,122960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122960>
- Jaugey, P.(1990). *Les bétons a haute performance du laboratoire aux chantiers*. [éd.] Y.Malier. s.l. : Les presses de l'école nationale des ponts et chaussées. ISBN 2-85978-138-2.
- Kansal, C, M & Goyal, R., (2021). Effect of nano silica, silica fume and steel slag on concrete properties. *Materials Today: Proceedings* 45, 4535–4540. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1162>
- Karakurt, C, Dumangöz, M (2022). Rheological and Durability Properties of Self-Compacting Concrete Produced Using Marble Dust and Blast Furnace Slag. *Materials* **15**, 1795. <https://doi.org/10.3390/ma15051795>.
- Khan MI (2003). Isoresponses for strength, permeability and porosity of high performance Mortar. *Building and Environment* 38(8), 1051–6. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00111-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00111-1)
- Kore, S.D. and Vyas, A.K. (2016), “Cost effective design of sustainable concrete using marble waste as coarse aggregate” , *J. Mater. Eng. Struct.*, **3**, 167-180.
- Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M. De Brito, J. and Shamsabadi, E.A. (2018), “Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder”*Constr. Build. Mater.*, 170, 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.116>
- Köksal, F, Altun, F, Yiğit, İ, Şahin, Y (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Constr. Build. Mater* 22(8), 1874-1880. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017>
- Laoufi, L, Senhadji, Y, Benazzouk, A, Langlet, T, Mouli, M, Laoufi, L et Benosman, AS., (2016). Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack). *J.Mater. Environ. Sci* 7(5), 1835-1845.

- Lee, J., Lee, T. (2020). Durability and Engineering Performance Evaluation of CaO Content and Ratio of Binary Blended Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Applied Sciences*, 10(7), 2504.
<https://doi.org/10.3390/app10072504>
- Li, L.G., Huang, Z.H., Tan, Y.P., Kwan, A.K.H. and Liu, F. (2018), “Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar” , *Constr. Build. Mater*, 166, 423-431.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.154>
- Li, T, Liu, X, Zhang, Y, Yang, H, Zhi, Z, Liu, L, ... Li, W (2020). Preparation of sea water sea and high-performance concrete (SHPC) and serving performance study in marine environment. *Construction and Building Materials*. 254, 119114.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119114>
- Liu, B. D, Lv, W. J, Li, L & Li, P, F (2014). Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. *Construction and Building Materials* 69, 133–142.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.094>
- Liu, Y, Shi, C, Zhang, Z, Li, N, Shi, D (2020). Mechanical and Fracture Properties of Ultra-High Performance Geopolymer Concrete: Effects of Steel Fiber and Silica Fume. *Cem. Concr. Compos.* 112, 103665.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103665>
- Malhotra, V. M., (1970)“Concrete Ring for Determining Tensile Strength of Concrete,” *ACI Journal*, V. 67, No. 4, 1970, pp. 354-357.
- Malier, Y.,(1992) “High Performance Concrete—from Material to Structures”, E&FN Spon, London.
- Mashaly, A.O, El-Kaliouby, B.A., Shalaby, B.N. and ElGohary, A.M. and Rashwan, M.A. (2016), “Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks” , *J. Clean. Prod*, 112(1), 731-741.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>
- Meng, W. (2017). Design and performance of cost-effective ultra-high performance concrete for prefabricated elements. https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/2582.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, **89(3)**, 768–774.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.003>
- Nadh V, S, Krishna, C, Natrayan, L. et al., (2021). Structural behavior of nanocoated oil palm shell as coarse aggregate in lightweight concrete. *Journal of Nanomaterials* vol. 2021, Article ID 4741296, 7 pages, 2021.
<https://doi.org/10.1155/2021/4741296>
- Özbay, E, Erdemir, M, Durmus H,I (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials* 105, 423–434.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>

P.C. Aïtcin, P.K. Mehta (1990). Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete .ACI Material Journal, 87(2), mars-avril, pp. 103-107..

Poon CS, Kou SC, Lam L (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. Construction and Building Materials 20(10),858–65.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001>

Ramezaniapour, A.A, Pilvar, A, Mahdikhani, M, Moodi, F (2011). Practical Evaluation of Relationship between Concrete Resistivity, Water Penetration, Rapid Chloride Penetration and Compressive Strength. Constr. Build. Mater 25, 2472–2479.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>

Ramezaniapour, A. M., Esmaeili, K., Ghahari, S. A., & Ramezaniapour, A. A. (2014). Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 73, 187–194. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09

R. Gagné, P-C. Aïtcin and P. Lamoth (1993) « Chloride-ion permeability of different concretes », In : Proceedings of the 6th International Conference on durability of building materials and components, Omiya, Japan, E & FN Spon, London, ISBN 0-419-18690-5, 1993, p. 1171-

R. Kumar (2017), Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete, Construction and Building Materials 142 (2017) 248-255

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.077>

Rossignolo, JA (2008). Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex. Construction and Building Materials 23(2),817–21.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.005>

Rivera, R,A, Sanjuán, M,Á, Martín, D,A (2020). Granulated blast-furnace slag and coal fly ash ternary portland cements optimization.Sustainability 12, 5783.

<https://doi.org/10.3390/su12145783>

Russell, H. G (1999), “ACI Defines High-Performance-Concrete,” Concrete International, V. 21, No. 2, 1999, pp. 56-57.

Sadek, D.M, El-Attar, M.M. and Ali, H.A. (2016), “Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development” , J. Clean. Prod, **121**, 19-32.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>

Safiuddin,Md, Raman. S. N et Zain, M.F.M. (2007), Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 1(2), 87-95.

- Sakshi. N. Shinde, Himani. B. Wagh, Shweta. B. Jadhav, Bharti. R. Patil, Ashwini. M. adam, Prashant. G. Chavan. (2022). A Partial Replacement of Cement and Fine Aggregate with MDP and GGBS. IJRASET. Volume 10 Issue V May 2022.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.42629>
- Samimi, K, Kamali-Bernard, S, Maghsoudi, A,A, Maghsoudi, M., Siad, H., (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, *Construct. Build. Mater* 151, 292–311.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071>
- Sampaio, ZLM, Martinelli, AE and Gomes, TS (2017). Formulation and characterization of structural lightweight concrete containing residues of porcelain tile polishing, tire rubber and limestone. *Cerâmica.*, (63), 530-535.
<https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682139>
- Siddique, R, (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resour. Conserv. Recycl* 55(11), 923-932. 805
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- Silva, J, de Brito, J and Veiga, R (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Const. Build. Mater.*, 23(1), 556–564.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014>
- Singh, M., Srivastava, A. and Bhunia, D. (2017), “An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry” , *Constr. Build. Mater.*, **134**, 471-488.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>
- Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2019). Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. *Construction and Building Materials*, 198, 553–569.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005>
- Solís-Carcaño, R., & Moreno, E. I., (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1225–1231.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014>
- Srikanth,S , Krishna, C, B, R , Srikanth, T, Sai Nitesh, K, J, N, Nadh, S,V, Kumar,S and Thanappan,S., (2022). Effect of Nano Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Volume % on Mechanical Behaviour of High-Performance Sustainable Concrete. *Journal of Nanomaterials*.5 pages.
<https://doi.org/10.1155/2022/3742194>
- Syed Afzal Basha, Faiz Uddin Ahmed Shaikh. (2023). Suitability of marble powders in production of high strength concrete. *Low-carbon Materials and Green Construction* (2023) 1:27.
<https://doi.org/10.1007/s44242-023-00029-z>

- Taji, I, Ghorbani, S, de Brito, J, Tam, V. W. Y, Sharifi, S, Davoodi, A, et Tavakkolizadeh, M (2018). Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.091>
- Tang, Z, Li, W, Tam, V, W,Y & Xue, C., (2020). Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation & Recycling X*, 6, 10003. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>
- Tao Luo , Cheng Hua , Fang Liu , Qiang Sun , Yu Yi , Xiaofeng Pan (2022). Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. *Case Studies in Construction Materials* 16 e01048. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01048>
- Topçu, İ. B., & Boğa, A. R. (2010). Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete. *Materials & Design*, 31(7), 3358–3365. <https://doi:10.1016/j.matdes.2010.01.057>.
- Ulubeyli, GC and Artir, R., (2015). Properties of hardened concrete produced by waste marble powder. *Procedia-Social and Behavioral Sci* 195(3), 2181–2190. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.294>
- Uysal, M. and Sumer, M. (2011), “Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures” , *Constr. Build. Mater*, 25, 4112-4120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032>
- Uysal, M., Yilmaz, K. and Ipek, I. (2012), “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete” , *Constr. Build. Mater*, 27, 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.049>
- Vardhan, K., Siddique, R. and Goyal, S. (2019), “Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble”, *Constr. Build. Mater.*, **203**, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.079>
- Vardhan, K., Siddique, R. and Goyal, S. (2019a), “Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete”, *Constr. Build. Mater.* 228,116730. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116730>
- Varadharajan, S., (2020). Determination of mechanical properties and environmental impact due to inclusion of fly ash and marble waste powder in concrete. *Structures* 25, 613-630. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.040>
- Vieira, T, Alves, A, de Brito, J, Correia, JR and Silva, RV., (2016). Durability related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. *Mater. Design* 90(15), 767-776. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.023>

Wong HS, Razak HA (2005). Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research* **35(4)**,696–702. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.051>

Xiao Hui Wang, Zhi Chao Fang, Li Zheng (2024). Effect of dose and types of the water reducing admixtures and superplasticizers on concrete strength and durability behaviour: A review. *Journal of Civil Engineering and Management*. Volume 30, Pages 33-48.

Y. Abbas, R. Djebien, N. Toubal Seghir et O. Benaimeche. (2023). Enhancing Mechanical Behaviour and Durability of High Performance Concrete with Silica Fume, Ground Blast <https://doi.org/10.2478/jaes-2023-0018>

Zamir Hashmi, S.R, Khan, M, I, Khahro, S, H, Zaid, O, Shahid Siddique, M, Md Yusoff, N,I (2022). Prediction of Strength Properties of Concrete Containing Waste Marble Aggregate and Stone Dust—Modeling and Optimization Using RSM. *Materials* **15**, 8024. <https://doi.org/10.3390/ma15228024069>

Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J. and Sun, B. (2020), “Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete” , *Constr. Build. Mater.*, **241**, 117980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>

Zhang, Z, Yuvaraj, A, Di, J, & Qian, S. (2019). Matrix design of light weight, high strength, high ductility ECC. *Construction and Building Materials*, **210**, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.159>.

Zia, P, Leming, M. L, and Ahmad, S. H,(1991) “High Performance Concretes, A State-of –the Art Report,” Report No. SHRP-C/FR-91-103, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C.

Zhuo Tang,Wengui Li, Guojun Ke, John L. Zhou,Vivian W.Y. Tam (2019). Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes. *Journal of Cleaner Production*. Volume 218, Pages 810-822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.337>

Normes Utilisées

[NFP 18-404] Décembre 1981-Bétons, Essais d'études, de convenance et de contrôle, confection et conversation des éprouvettes, Éditions AFNOR, Paris.

[NFP 18-405] Décembre 1981-Bétons, Essais d'information, confection et conversation des éprouvettes, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12350-2] Juin 2019, Essai pour béton frais –Partie 2 : Essai d'affaissement, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12350-7] Juin 2019, Essai pour béton frais –Partie 7: Teneur en air-Méthode de la compressibilité, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12350-6] Juin 2019, Essai pour béton frais –Partie 6 : Masse volumique, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12390-3] Juin 2019, Essai pour béton durci –Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12390-5] Juin 2019, Essai pour béton durci –Partie 5: Résistance à la flexion des éprouvettes, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12504-2] Juillet 2021, Essai pour béton dans les structures –Partie 2: essais non destructifs- détermination de l'indice de rebondissement, Éditions AFNOR, Paris.

[NF EN 12504-4] Juillet 2021, Essai pour béton dans les structures –Partie 4: détermination de la vitesse de propagation des ultrasons, Éditions AFNOR, Paris.

[NBN B 15-215] Norme Belge (2018), Essais sur béton durci-Absorption d'eau par immersion, Éditions NBN, Bruxelles.

[ASTM C1585-11] Aout 2020, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes,, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

[ASTM C267-96] Aout 2020, Standard Test Methods for chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Poymer Concretes.

Annexes

Fiche technique de la Fumée de silice



Condensil S-95 DP

FUMÉE DE SILICE DENSIFIÉE POUR BÉTONS HAUTES PERFORMANCES ET HAUTE DURABILITÉ

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Condensil S-95 DP est une fumée de silice ultra fine densifiée pneumatiquement issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

DOMAINES D'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP permet de fabriquer des :

- BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- Bétons résistants aux milieux agressifs : domaines agricoles (ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation), milieu industriel (chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, stations services, stations d'épuration, égouts), milieu marin (digue, aménagement portuaire, ...), zone de montagne (présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage),
- Bétons pompables
- Bétons projetés

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Ultrafine et dotée d'un fort pouvoir pouzzolanique, la fumée de silice Condensil S-95 DP confère aux bétons les propriétés suivantes : améliore les performances mécaniques à longs termes :

- résistances en compression, flexion et traction, module d'élasticité, le fluage, la résistance à l'abrasion et à l'érosion, ...
- améliore la durabilité en milieux agressifs en diminuant la porosité et la perméabilité aux gaz et aux liquides: carbonatation, sulfate, chlorure, acides, eaux pures, ...
- diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes de réaction sulfatique interne et d'alcali-réaction,
- réduit les risques de ségrégation et de ressuage, facilite le pompage des bétons y compris ceux qui sont peu dosés en ciment.

AGRÉMENTS / NORMES

Marquage CE selon la norme NF EN 13263-1 & 2.

Caractéristiques	Exigences normatives	Valeurs observées
Densité apparente	~ 0,65 (0,55 à 0,75)	0,64 ± 0,03
Densité réelle	2,24	F
Surface spécifique BET (m ² /g)	Entre 15 et 35	22,5 ± 2
Teneur en SiO ₂	≥ 85 %	95 % ± 2
Teneur en Si élémentaire	≤ 0,4 %	0,14 % ± 0,05
Teneur en Na ₂ O eq.	≤ 1,0 %	0,50 % ± 0,1
Teneur en SO ₃	≤ 2,0 %	0,27 % ± 0,50
Teneur en Cl-	≤ 0,1 %	0,01 % ± 0,01
Indice d'activité à 28j	≥ 100 %	≥ 101 %
Perte au feu	≤ 4,0 %	2 % ± 0,5
Teneur CaO	≤ 1,0 %	< 0,1 %

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	Vrac Big-Bag de 1000 kg et 1250 kg
Aspect / Couleur	Poudre grise
Durée de Conservation	En respectant les conditions de stockage, le produit se conserve 3 ans.
Conditions de Stockage	En silo (spécialement équipé, nous contacter) ou dans son emballage intact dans un local à l'abri de l'humidité.

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP doit être introduite avec le ciment.

Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice Condensil S-95 DP, il est indispensable de déflocculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, la fumée de silice Condensil S-95 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant /haut réducteur d'eau de type Sika* ViscoCrete*

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Fiche technique de superplastifiant



MasterGlenium SKY 3080®

Superplastifiant, haut reducteur d'eau avec un long maintien de rhéologie

DESCRIPTION

MasterGlenium SKY 3080 est un superplastifiant haut reducteur d'eau, issu du long savoir de BASF Construction Chemicals en termes de formulation et d'innovation. MasterGlenium SKY 3080 a été développé pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises.

Particularités du MasterGlenium SKY 3080

Il se différencie des superplastifiants traditionnels par sa facilité d'utilisation notamment pour les bétons fluides et auto-plaçant, même avec des dosages très faibles. Cette faible viscosité alliée à une grande robustesse de béton permettent au MasterGlenium SKY 3080 d'améliorer considérablement le comportement dynamique et ainsi la mise en œuvre des bétons, tout en optimisant le dosage en liant du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

MasterGlenium SKY3080 est recommandé pour la fabrication de béton de consistance plastique à auto-plaçant nécessitant un long maintien d'ouvrabilité (2heures et plus) et aux performances initiales élevées. MasterGlenium SKY 3080 est donc adapté à l'industrie du béton prêt à l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Recommandé pour les usages suivants :

- Béton à très long maintien d'ouvrabilité
- Béton Pompé à longues distances
- Béton architectonique
- Béton Auto Plaçant
- Béton Auto Nivelant
- Béton à faible E/C et long maintien d'ouvrabilité

PROPRIÉTÉS ET AVANTAGES

MasterGlenium SKY 3080 a un excellent effet d'ouvrabilité qui permet de conserver une consistance S4 ou S5 sur des bétons à faibles E/C pendant 120 minutes sans retard de prise

MasterGlenium SKY 3080 offre les avantages suivants :

- Béton à faible viscosité même à faible rapport E/C
- Long maintien d'ouvrabilité sans retard de prise préjudiciable
- Béton à haute performance
- Optimisation des dosages en liant
- Grande plage de dosage possible
- Bonne réactivité avec les granulats concassés

- Bonne robustesse vis-à-vis du ressuage et de la ségrégation
- Amélioration de la durabilité liée au faible E/C
- Pompage sur de longues distances
- Amélioration de la durabilité liée au faible E/C
- Pompage sur de longues distances
- Amélioration des parements

CARACTÉRISTIQUES

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Densité à 25 °C	1,08 ± 0,03 g/cm ³
Chlorures	<0,1%
pH	5,5 ± 1,8
Extrait sec	25 ± 1,5%
Teneur en Nitrate	< 2%

MODE D'EMPLOI

L'effet optimal est obtenu par incorporation du MasterGlenium SKY 3080 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois il est possible d'incorporer le produit dans l'eau de gâchage. Eviter d'ajouter le MasterGlenium SKY 3080 sur les granulats secs.

DOSAGE

Plage normale d'utilisation

0.2 % à 1,7% du poids du ciment, soit 0.19 Litres à 1,9Litres pour 100 Kg de ciment. Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC. Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

COMPATIBILITÉ

Pour une utilisation en synergie avec un autre adjuvant de la gamme BASF, consultez votre représentant local BASF Construction Chemicals Algeria

CONDITIONNEMENT

MasterGlenium SKY 3080 est disponible dans les conditionnements suivants :

- Container de 1000 litres
- Fût de 210 litres
- En vrac

MASTER®
» BUILDERS
 SOLUTIONS



We create chemistry

MasterGlenium SKY 3080®

Superplastifiant, haut reducteur d'eau avec un long maintien de rhéologie

RECOMMANDATION

En cas de gel, réchauffer le produit à une température proche de $\pm 30^{\circ}\text{C}$ et agiter mécaniquement

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

MasterGlenium SKY 3080 ne contient aucune matière dangereuse nécessitant un étiquetage particulier. Pour de plus amples informations, se référer à la fiche de données de sécurité

STOCKAGE

MasterGlenium SKY 3080 doit être stocké à une température supérieure à 5°C . Il doit être stocké comme signaler dans la fiche de données de sécurité.

DURÉE DE VIE

La durée de conservation est de 12 mois, à compter de la date de fabrication

Les informations données sont réelles, représentant notre savoir actuel et sont basées non seulement sur des essais en laboratoire mais également sur les expériences externes. Cependant, du fait de nombreux facteurs affectant les résultats, nous offrons ces informations sans garantie et aucune responsabilité ne pourra nous être imputée. Pour plus d'informations ou de questions, contacter votre représentant local.

BASF Construction Chemicals
Zone Industrielle Sidi Moussa, Route de Dar El Beldia,
District 13 lot N° 15 Alger, Algérie
Tel. +213 (0) 21 760 220/222
Fax +213 (0) 21 760 233

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact de votre représentant local.

® = registered trademark of BASF group in many countries

MASTER®
» BUILDERS
SOLUTIONS

Analyse physique-chimique du ciment



Département Qualité

CERTIFICAT DE QUALITE

Date de Prélèvement : 17 - Mars - 21

Type du Ciment : Ciment Portland au Calcaire NA 442 - CEM II / A-L 52,5
Serie

CARACTERISTIQUES PHYSICO- CHIMIQUES DU CIMENT

Caractéristiques	Normes	Résultats	Unité
SiO ₂	NA 5042	18.86	%
Al ₂ O ₃		5.17	%
Fe ₂ O ₃		3.08	%
CaO		63.88	%
K ₂ O		0.64	%
Na ₂ O		0.17	%
Na ₂ O-Equ			%
Perte au feu 'PAF'	NA 5042	2.97	%
Teneur en oxyde de Magnésium (MgO)		1.48	%
Teneur en anhydrite sulfurique (SO ₃)	NA 5042	2.68	%
Chlorure	NA 5042	0.025	%
Finesse Blaine (cm ² /g)	NA231	3895	%
Début du Temps de Prise (min)		200	%
Fin du Temps de Prise (min)	NA230	267	%
Expansion "Le Chatelier" (mm)	NA230	0.50	%
Densité		3.07	

RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR MORTIER

Échéances	Normes	Résultats	Unité
2 Jours en MPa	NA234	30.40	MPa
7 Jours en MPa		45.10	
28 Jours en MPa		56.00	

