

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE DE 8 MAI 1945 GUELMA

جامعة 8 ماي 1945 قالمة

FACULTE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

Spécialité : Matériaux et structures



THÈSE

**EN VUE DE L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN SCIENCES
OPTION MATERIAUX ET STRUCTURES
PRESENTEE PAR**

DJERFAF NADJAT

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA DURABILITE
DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES A BASE
DES MATERIAUX LOCAUX.**

Thèse soutenue le 11 Novembre 2025 devant le jury composé de :

Pr Cherait Yacine

Pr Nafa Zahreddine

Pr Belaidi Akram Salah Eddine

Pr Achoura Djamel

Pr Naceri Abdelghani

Université de Guelma

Université de Guelma

Université de Laghouat

Université d'Annaba

Université de M'sila

Président

Rapporteur

Co-rapporteur

Examineur

Examineur

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I : Recherche bibliographique.....	05
I.1 Introduction.....	05
I.2 Formulation des BHP.....	05
I.2.1 Méthode américaine.....	06
I.2.2 Méthode simplifiée de Mehta et Aitcin	08
I.2.3 Méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.....	10
I.2.4 Méthode des coulis.....	12
I.2.5 Méthode de mini cône	12
I.2.6 Méthode du cône Marsh	12
I.2.7 Méthode des coulis proposée par LCPC.....	13
I.3 Durabilité des bétons aux attaques des acides	14
I.3.2 Revues bibliographies	15
I.4 Durabilité des bétons aux attaques des sulfates.....	31
I.4.1 Processus d'attaque des sulfates	32
I.4.2 Action des sulfates.....	33
I.4.3 Revues bibliographies.....	34
I.5. Perméabilité aux gaz	51
I.5.1 Détermination de la perméabilité aux gaz :.....	51
I.5.2 Revues bibliographies.....	54
I.6 Carbonatation du béton.....	58
I.6.1 Propagation du CO ₂ dans le béton et sa dissolution dans la solution interstitielle.....	58
I.6.2 Carbonatation de la Portlandite	59
I.6.3 Carbonatation des silicates de calcium hydratés CSH	59
I.6.4 Les facteurs clé affectant la carbonatation des bétons.....	60
I.6.5 Principales conséquences de la carbonatation.....	60
I.6.6 Revues bibliographies.....	62
I.7. Synthèse de chapitre	65
CHAPITRE II : PROTOCOLES EXPERIMENTAUX UTILISES.....	68

II.1 Introduction.....	68
II.2. Testes réalisés sur les granulats.....	68
II.3. Essais réalisés sur le ciment.....	70
II.4. Essais réalisés sur l'adjuvant.....	71
II.5. Essais réalisés sur le béton.....	72
II.5.1. Consistance du béton.....	72
II.5.2. Résistance mécanique.....	72
II.5.4 Essai de l'auscultation dynamique.....	74
II.5.5. Essai réalisé pour la détermination de la durabilité du béton.....	75
II.5.5.2 Perméabilité au gaz de béton durci.....	75
II.5.5.3 Teste de la carbonatation accélérée.....	78
II.5.6. Protocoles utilisés pour déterminer la durabilité des bétons aux attaques des acides et aux sulfates.....	80
II.5.6.1 Attaques unique de l'acide sulfurique et l'acide acétique	80
II.5.6.2 Attaque par un mélange d'acides sous une température ambiante 20C°.....	81
II.5.6.3 Attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	82
II.5.6.4 Attaques par un mélange d'acides sous une température élevée de 50C°.....	83
II.5.6.5 Attaques par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous une température ambiante 20C°.....	84
II.5.6.6 Attaques par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous l'effet des cycles gel/dégel.....	85
II.5.6.7 Attaques par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous l'effet d'une température élevée de 50C°.....	86
II.7. Synthèse de chapitre	86
 Chapitre III : Formulation des bétons à hautes performances.....	87
III.1 Introduction.....	87
III.2 Formulation des BHP	87
III.3 Résultats.....	89
III.4 Etude comparative	103
III.5 Synthèse de chapitre	105
 Chapitre VI : Durabilité aux acides.....	108
VI.1 Introduction.....	108
VI.2 Résultats et discussion.....	108
VI.2.1 Attaque uniques de l'acide sulfurique et l'acide acétique.....	108
VI.2.2 Attaque par un mélange d'acides sous une température ambiante 20C°.....	120

V.2.3 Attaque des mélanges d'acides combinés à l'effet de gel/dégel.....	127
V.2.4 Attaque des mélanges d'acides combinés à une température élevée de 50C°.....	134
V.2.5 Etude comparative.....	140
VI.2.6 Analyses microstructures.....	144
VI.3 Synthèse de chapitre	162
Chapitre V : Durabilité aux sulfates.....	164
V.1. Introduction.....	164
V.2. Résultats et interprétation.....	164
V.2.1. Durabilité des BHP faces aux agressions causés par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous une température ambiante 20C°.....	164
V.2.2. Durabilité des BHP faces aux agressions causés par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous l'effet des cycles gel/dégel.....	173
V.2.3. Durabilité des BHP faces aux agressions causés par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous l'effet d'une haute température de 50C°.....	179
V.3. Etude comparative.....	183
V.4 Analyses microstructures.....	186
V.5 Synthèse de chapitre	195
Chapitre VII : Transfert gazeux.....	197
VII.1. Introduction.....	197
VII.2. Résultats et discussion.....	197
VII.2.1. Perméabilité au gaz.....	197
VII.2.1.3. Etude comparative	200
VII.2.2. Carbonatation	205
VII.2.2.1. Mesure de la profondeur de la carbonatation des BHP	205
VII.2.3. Synthèse de chapitre	206
Conclusions générale.....	208
Perspectives.....	212
Annexe.....	217

Liste des tableaux

Tableau III. 1: Caractéristiques physiques des sables.....	88
Tableau III.2 : Composition chimique de ciment CEM II A 52.5.....	89
Tableau III.3 : Caractéristiques du ciment CEM II A 52.5..	89
Tableau III.4 : Caractéristiques de super-plastifiant.....	89
Tableau III.5 : Caractéristiques de la fumé de silice.....	89
Tableau III.6 : Compacité élémentaires des différentes classes granulaires utilisées.....	91
Tableau III.7: Compacité des mélanges binaires granulats concassés G_1 :4-8/ G_2 :8-16.....	93
Tableau III.8 : Compacité des mélanges binaires granulats concassés G_1 :4-8/ G_2 :16-20...93	
Tableau III.9: Compacité des mélanges binaires granulats concassés G_1 :8-16/ G_2 :16-20...94	
Tableau III.10 : Compacité des mélanges binaires granulats 0-4 roulés et concassés 0-4R/0-4C.....	94
Tableau III.11: Compacité des mélanges ternaire granulats concassés 4-8/8-16/16-20.....	95
Tableau III.12: Compacité des mélanges ternaire granulats concassés 8-16/4-8/16-20.....	96
Tableau III.13: Compacité des mélanges ternaire granulats concassés 16-20/8-16/4-8.....	96
Tableau III.14: Compacité des mélanges quaternaires granulats concassés+roulés 0-4R/4-8/8-16/16-20.....	98
Tableau III.15: Compacité des mélanges quaternaires granulats concassés+roulés 0-4C/4-8/8-16/16-20.....	98
Tableau III.16: Compacité des mélanges quintuples (granulats concassés+roulés 0-4RC/4-8/8-16/16-20).....	100
Tableau III.17: Formulations des BHP proposées.....	101
Tableau III.18 : évolutions de résistance mécanique des formulations proposées.....	102
Tableau III.19 : Comparaison des formulations proposées avec les BHP 2000.....	104
Tableau III.20 : Comparaison des évolutions de résistance mécanique des formulations proposées avec les BHP 2000.....	105
Tableau IV.6: Comparaison des résultant.....	120
Tableau VI.1 : Perméabilité au gaz des BHP proposés, résistance moyenne à la compression, taux de saturation, porosité accessible à l'eau.....	197
Tableau VI.2 : Comparaison des formulations proposées avec les BHP 2000.....	201

Liste des tableaux

Tableau VI.3 : Comparaison des évolutions de résistance mécanique des formulations proposées avec les BHP 2000.....	202
Tableau VI.4: Perméabilité au gaz des BHP proposés, résistance moyenne à la compression, taux de saturation, porosité accessible à l'eau. Comparaison avec les BHP 2000.....	203
Tableau VI.5 : profondeur de carbonatation h_c mesurée à différentes âges.....	206

Figure I.1 : Représentations obtenues par MEB sur un échantillon de béton M 25 CV	6
Figure I.2: Représentations obtenues par MEB sur un échantillon de BHP M 120 FS	6
Figure I.3 : Relation proposée entre la résistance à l'eau et la résistance à la compression....	10
Figure I.4 : Détermination du dosage minimal d'eau.....	11
Figure I.5 : Contenu de gros granulats.....	11
Figure I.6: Mine cône.....	12
Figure I.7 : Détermination de la dose de saturation.....	13
Figure I.8 : dosage de saturation selon le groupe l'AFREM de LCPC.....	14
Figure I.9: État de la surface d'un échantillon de béton soumis à une solution acide lors de différentes phases.....	19
Figure I.10 : Relation entre la durée d'immersion et la résistance à la traction du béton détérioré.....	19
Figure I.11 : Spectre SEM/EDS d'un échantillon de béton sous différents états d'endommagement : (a) Spectres EDS d'un échantillon de béton sous différents états d'endommagement, (b) Évolution des teneurs pondérales en éléments chimiques.....	21
Figure I.12 : Perte relative de masse, a : acide chlorhydrique, b : acide sulfurique, C : acide lactique des BHP avec FS varie de 0%, 8% et 15 %.....	22
Figure I.13 : Valeurs de résistance à la compression dans différents environnements en relation avec la résistance moyenne à la compression après 28 jours	23
Figure I.14. Photographies d'échantillons avec lignes de profil tracées (lignes bleues) : (a) en milieu acide ; (b) en milieu neutre ; et structure géométrique des surfaces d'échantillons analysées en 3D (d) en milieu acide ; (e) en milieu neutre	23
Figure I.15. Profils de rugosité le long des lignes de profil (en bleu) de la figure 10 a–b : (a) dans un milieu acide et (b) en environnement neutre.....	24
Figure I.16. Images SEM d'un échantillon immergée dans un environnement acide : (a) bord de l'échantillon (grossissement 40×) ; (b) coin de l'échantillon (grossissement 40×) ; (c) grossissement 400×.....	24
Figure 17-a : Perte relative en masse.....	25
Figure 17-b : taux de réduction de la résistance à la compression.....	25
Figure I.18: Aspect des échantillons après l'attaque par les acides	26

Figure I.19: image MEB d'un mélange de béton contenant 30% de cendres volantes et 10% de cendres volantes ultra fines exposées pendant 28 jours Image MEB d'un béton composé de 30 % de cendres volantes et de 10 % de cendres volantes ultra fines, soumis à une période d'exposition de 28 jours à (a: eau, b: 3% H_2SO_4 , C:1.5% acide nitrique HNO_3)	27
Figure. I.20. Impact des adjuvants sur la diminution de la masse du mortier composé de cendres volantes activées par un alcali et de laitier.	28
Figure I.21. Présentation visuelle des échantillons de pâte de ciment durci HPC, avec un rapport e/c de 0,4, après avoir durci pendant 25 jours dans l'eau. (en haut à gauche) et après leur exposition dans une solution agressive d'acide	29
Figure I.22. Augmentation de la profondeur de corrosion dans les HCP (e/c = 0,4) dans les tubes en verre dans les solutions agressives de différents acides à concentration constante (c = 0,1 mol.dm ⁻³)	29
Figure I.23. Résistance à la compression des spécimens de HCP exposé à l'agression d'acide chlorhydrique, d'acide sulfurique et d'un mélange des deux. La teneur en ions H^+ dans chaque solution était égale ($[H^+] = 0,25$ mol/l)	30
Figure I.24. Coupe d'un échantillon attaqué par la solution d'acide sulfurique avec images SEM des secteurs voisins de la zone de réaction et des cristaux de gypse au sein de la couche affectée.	30
Figure I.25 : Résistance relative à la compression en fonction du temps pour les pâtes OPC (Mix I) immergés dans des solutions de	35
Figure I.26 : Diagrammes de diffraction des rayons X des mortiers de la série PK après 120 jours d'exposition à la solution de Na_2SO_4 . Le mortier témoin PK-0 a été immergé dans eau	36
Figure I.27. Images MEB et résultats EDS relatifs au béton exposé à des solutions de sulfate à 10 % pour (a) béton préfabriqué, grossissement = 5 K, et (b) béton coulé sur place, grossissement = 2,5 K	37
Figure I.28. Analyse par DRX de béton exposé à des solutions de sulfate à 10 % pour (a) béton préfabriqué, et (b) béton coulé sur place	38
Figure I.29. Concentration en sulfate dans les bétons rapports eau/ciment : 0,55, solution 10 % de sulfates de sodium Na_2SO_4	38
Figure I.30 : image MEB sur la surface attaquée par le sulfate d'ammonium	39

Figure I.31 : Evolution de la résistance à la compression	40
Figure I.32 : Diagramme DRX de la pâte de ciment à base de CPJ plongée dans $\text{Al}_2(\text{SO}_4)3.18\text{H}_2\text{O}$	40
Figure I.33: Perte relative de la résistance de BHP M_{80} en %	41
Figure 34 : Perte relative de la résistance de BHP M_{90} en %	42
Figure I.35 : Comparaison Evolution de la résistance à la compression.....	42
Figure I. 36: (a) Variation de la résistance à la compression des échantillons de béton (b) Taux de variation de la résistance	43
Figure I. 37 : Expansion des barres de mortier ARI, SF et RHA soumises à des solutions de Na_2SO_4 et MgSO_4 (0,7 mol/L) pendant 42 et 140 jours (6 et 20 semaines)	44
Figure I.38 : Diffractogrammes CP après 20 semaines d'exposition à $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2SO_4 et MgSO_4 . Monocarboluminate (A), brucite (B), calcite (C), ettringite (E), gypse (G) et portlandite (P)	45
Figure I.39 : Diffractogrammes SF après 20 semaines d'exposition à $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2SO_4 et MgSO_4 . Monocarboluminate (A), brucite (B), calcite (C), ettringite (E), gypse (G) et portlandite (P).....	45
Figure I.40 : Diffractogrammes RHA après 20 semaines d'exposition à $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2SO_4 et MgSO_4 . Monocarboluminate (A), brucite (B), calcite (C), ettringite (E), gypse (G) et portlandite (P)	46
Figure I.41 : Résistance à la flexion et à la compression des échantillons jusqu'à 20 semaines d'exposition dans les trois solutions différentes [$\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2SO_4 et MgSO_4]	46
Figure. I.42. Etat des éprouvettes de mortiers a base de CSP-SCM et LSP-SCM stockés dans une solution à 5 % en poids de Na_2SO_4 à 20 °C et 5°C durant 18 mois.....	48
Figure. I.43 : Résistance à la compression des mortiers CSP-SCM comparée avec les mortiers LSP-SCM exposés à une solution de sulfate de sodium à 5 % en poids pendant une durée maximale de 540 jours	48

Figure I. 44 : Représentations de la diffraction des rayons X des mortiers intégrant des CSP et des FA soumis à une solution de sulfate de sodium à 5 % sous l'effet des températures 20 °C et 5 °C pendant 540 jours maximum	49
Figure I. 45. Images SEM de mortiers composés de CSP, FA, SF et laitier (slag), exposés à une solution de sulfate de sodium à 5 % en poids à 5 °C pendant 540 jours, entraînant une corrosion.....	50
Figure I.46: Système de mesure de la perméabilité des gaz.....	51
Figure I.47: Distribution des vitesses d'un fluide visqueux à l'intérieur d'un tube capillaire..	52
Figure I.48: distribution des vitesses d'un gaz dans d'un tube capillaire.....	52
Figure I.49: Illustration schématique de l'impact de la saturation sur les transferts gazeux (Verdier) [61].....	53
Figure I. 50 Perméabilité intrinsèque du béton en en fonction de taux de saturation.....	54
Figure I.51 : Evolution de la perméabilité apparente aux gaz des 15 types de bétons en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours	55
Figure I.52: Impact de la température sur la perméabilité intrinsèque des mortiers et des bétons, qu'ils soient ordinaires ou de haute performance	56
Figure I.53 : Schéma du site de stockage souterrain, avec un agrandissement sur la zone des déchets.....	57
Figure I.54 : Schéma d'une alvéole de stockage de déchets B	57
Figure I.55 : Diagramme de Tuutti modifié : (1) dépassement des armatures, (2) apparition de fissures, (3) éclatement du béton en surface et (4) destruction.....	61
Figure I.56: Comparaison des profondeurs carbonatées mesurées sur les carottes issues des corps d'épreuve du site de Maurienne et sur éprouvettes prismatiques 70×70×280 mm après 28 jours de cure humide et essai accéléré en laboratoire à 14 jours d'exposition au CO ₂ 50±5 %).	62
Figure I.57: Aspect des éprouvettes après la pulvérisation de phénolphthaléine	63
Figure I.58: Évaluation de la profondeur de carbonatation par l'application de phénolphthaléine	64
Figure I.59: Cinétiques de carbonatation (essai accéléré à HR = 71,5 % et à [CO ₂] = 50 %) des pâtes de ciment présentant divers rapports E/C, toutes élaborées à partir du même ciment CEM I, ont été évaluées par pulvérisation de phénolphthaléine à différentes périodes.....	64
Figure II. 1: Détermination de la dose de saturation.....	72

Figure II.2 : La presse utilisée pour la compression.....	73
Figure II.3 : dispositif d'essai de flexion.....	74
Figure II.4: Appareil à ultrason.....	75
Figure II.5 : cellule de mesurer la perméabilité au gaz.....	76
Figure II.6: schéma de principe pour le fonctionnement de permèamètre au gaz.....	76
Figure II.7 : appareil de mesure de la perméabilité des gaz employé à l'université de Laghouat.....	77
Figure II.8 : Profondeur de béton carbonaté.....	79
Figure II.09 : L'appareille de carbonatation utilisée.....	79
Figure II.10 : Conservation des éprouvettes dans des bacs en plastique.....	80
Figure II.11 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par l'acide sulfurique avant nettoyage des éprouvettes.....	81
Figure II.12 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par l'acide acétique avant nettoyage des éprouvettes.....	81
Figure II.13 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides avant nettoyage.....	82
Figure II.14 : Enceinte congélateur utilisée pour effectue l'essai.....	83
Figure II.15 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel avant nettoyage.....	83
Figure II.16: étuve utilisé pour effectue l'essai.....	84
Figure II.17 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides sous l'effet de température 50c° après avant nettoyage des éprouvettes.....	84
Figure II.18 : État des éprouvettes après un mois d'exposition à une solution de MgSO ₄	85
Figure II.19: État des éprouvettes après un mois d'exposition à une solution de 5 % de MgSO ₄ , soumis aux cycles de gel et de dégel.....	86
Figure III.1 : Dosage en superplastifiant compositions sans fumé de silice.....	90
Figure III.2 : Dosage en superplastifiant compositions avec fumé de silice.....	90
Figure III.3 : Compacité granulaires des différentes classes élémentaires.....	92
Figure III.4 : Compacité des mélanges binaires.....	95
Figure III.5 : Compacité des mélanges ternaires.....	97
Figure III.6 : Compacité des mélanges quaternaires.....	99
Figure III.7 : Compacité des mélanges quintuples.....	101
Figure III.8 : Résistance mecanique a la compression.....	102
Figure III.9 : Résistance mécanique à la flexion.....	103

Figure IV.1 : Evolution de PH des solutions acides après immersions des éprouvettes en BHP.....	113
Figure IV.2a : Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes.....	114
Figure IV.2b : Profondeur altérée après l'attaque de l'acide acétique et sulfurique.....	115
Figure IV.3: Variations relatives de la masse après l'interaction avec l'acide acétique et l'acide sulfurique.....	116
Figure IV.4 : Variation de la porosité accessible à l'eau des échantillons avant et après l'exposition à l'acide acétique et à l'acide sulfurique.....	116
Figure IV.5 : Variation de la résistance mécanique à la compression des échantillons avant et après immersion dans l'acide acétique et de l'acide sulfurique.....	117
Figure IV.6 : Diminution relative de la masse des BHP plongés dans une solution d'acide sulfurique à 1 % sur une période allant jusqu'à 48 semaines.....	118
Figure IV.7: Diminution relative de la masse des BHP plongés dans une solution d'acide sulfurique de 03% et 7% jusqu'à 61 jours.....	119
Figure IV.8 : Diminution relative de la masse des BHP plongés dans une solution d'acide sulfurique de 15% jusqu'à 40 jours.	119
Figure IV.9 : Evolution du pH des solutions acides suite à l'immersion des éprouvettes en BHP à une température de 20 °C.....	120
Figure IV.10 : Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais sous une température de 20C°.....	121
Figure IV.11 : La profondeur altérée après l'exposition à un mélange d'acides à une température de 20 °C.....	121
Figure IV.12 : Diminution relative de la masse suite à l'attaque par un mélange d'acides à une température de 20 °C.....	122
Figure IV.13 : Variation de la porosité accessible à l'eau des échantillons avant et après l'attaque de mélange d'acides sous une température de 20C°.....	123
Figure IV.14: Variation de la vitesse du son avant et après l'interaction des acides à une température de 20 °C.....	123
Figure IV.15: Taux de variation dimensionnelle avant et après l'attaque de mélange d'acides sous une température de 20C°.....	124
Figure IV.16: Variation de la résistance à la compression avant et après l'interaction avec un mélange d'acides à une température de 20 °C.....	125
Figure IV.17: Comparaison des pertes relatives de masse engendrées par l'attaque d'un mélange d'acides à une température de 20 °C.....	126

Figure IV.18 : Analyse de la porosité accessible à l'eau après l'attaque de mélange d'acides sous une température de 20°C°.....	126
Figure IV.19: Comparaison de la résistance à la compression après l'agression des acides à une température de 20°C.....	127
Figure IV.20: Variation du pH des solutions acides après l'interaction avec un mélange d'acides, sous l'effet des cycles gel/dégel.....	128
Figure IV.21 : Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	128
Figure IV.22: Profondeur altérée des éprouvettes après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	129
Figure IV.23 : Evolution des masses après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	130
Figure IV.24: Pertes relatives de masse après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	130
Figure IV.25: Évolution de la porosité accessible à l'eau avant et après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	131
Figure IV.26: Evolution de la vitesse du son avant et après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	132
Figure IV.27: Taux de variation dimensionnelle après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	132
Figure IV.28: Évolution de la résistance à la compression avant et après l'exposition à un mélange d'acides, sous l'influence des cycles de gel et de dégel.....	133
Figure IV.29: Evolution de la résistance mécanique à la flexion avant et après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.....	133
Figure IV.30 : Évolution du pH des solutions de mélanges acides après immersion des éprouvettes en BHP et sous l'influence d'une température élevée de 50°C°.....	134
Figure IV.31 : L'aspect des éprouvettes, tant sur le plan extérieur qu'intérieur, après l'exposition à un mélange d'acides suite à leur immersion en BHP et sous l'effet une température élevée de 50°C°.....	135
Figure IV.32 : Profondeur altérée après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50°C°.....	135
Figure IV.33 : Évolution des pertes relatives de masse suite à l'attaque par un mélange d'acides après immersion des échantillons en BHP et sous l'effet une température élevée de 50°C°.....	136

Figure IV.34: Pertes relatives de masse après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.....	136
Figure IV.35: Évolution de la porosité accessible à l'eau avant et après l'exposition à un mélange d'acides des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°...	137
Figure IV.36: Evolution de la vitesse du son avant et après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°..	138
Figure IV.37: Taux de variation dimensionnelle après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.....	139
Figure IV.38: Évolution de la résistance à la compression des échantillons avant et après leur exposition à un mélange d'acides et sous l'effet une température élevée de 50C°.....	139
Figure IV.39: Evolution de la résistance mécanique à la flexion des échantillons avant et après leur exposition à un mélange d'acides et sous l'effet une température élevée de 50C°	140
Figure IV.40: Evolution de pH des solutions acides après l'immersion des éprouvettes en BHP, selon les protocoles adoptés.....	140
Figure IV.41: Pertes relatives de masse sous l'effet des conditions climatiques.....	141
Figure IV.42: Évolution de la porosité sous l'effet des conditions climatiques.....	142
Figure IV.43: Evolution de la résistance mécanique à la compression sous l'effet de conditions climatiques utilisées.....	143
Figure IV.44: Variation résistance mécanique à la flexion sous l'effet des conditions climatiques utilisées.....	143
Figure IV.45: Taux de variation de la résistance mécanique à la compression sous l'effet de conditions climatiques utilisées.....	144
Figure IV.46: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS a été exposé à une solution contenant 5 % d'acide acétique pendant une période de quatre mois.....	147
Figure IV.47: Observation au MEB et DRX pour l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide acétique.....	148
Figure IV.48: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide sulfurique.....	151
Figure IV.49: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide sulfurique.....	151
Figure IV.50 : Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS qui a été soumis à une immersion de quatre mois dans une solution	

composée de 5 % d'acide acétique et de 5 % d'acide sulfurique, à une température de 20 °C.....	154
Figure IV.51 : Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS qui a été soumis à une immersion de quatre mois dans une solution composée de 5 % d'acide acétique et de 5 % d'acide sulfurique, à une température de 20 °C.....	155
Figure IV.52: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution de composée d'un mélange de 5 % d'acide acétique et de 5 % d'acide sulfurique, soumise aux cycles de gel et de dégel.....	158
Figure IV.53: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide acétique et 5% de l'acide sulfurique sous l'effet des cycles de gel/dégel.....	158
Figure IV.54: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution à base de mélange de 5% d'acide acétique et 5% d'acide sulfurique sous l'effet d'une haute température de 50C°	161
Figure IV.55: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide acétique et 5% de l'acide sulfurique sous l'effet d'une température élevée de 50C°	161
Figure V.1 : Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes testées sous une température de 20C°	164
Figure V.2: Taux de variation de la masse des échantillons soumis à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,25.....	166
Figure V.3: Variation de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,25.....	166
Figure V.4 : Taux de variation de la masse des échantillons soumis à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,3.....	167
Figure V.5 : Variation de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes examinées à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,3.....	167
Figure V.6 : Taux de variation de la masse des échantillons soumis à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,35.....	168
Figure V.7 : Variation de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes examinées à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,35.....	168
Figure V.8 : Taux de variation de la résistance à la compression des échantillons soumis à une température de 20 °C.....	169

Figure V.9: Variation de la porosité des échantillons soumis à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,25.....	170
Figure V.10: Variation de la vitesse du son des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec un coefficient E/C de 0,25.....	170
Figure V.11: Variation de la porosité des échantillons soumis à une température de 20 °C avec E/C=0.3.....	171
Figure V.12: Variation de la vitesse du son des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec E/C=0.3.....	171
Figure V.13: Variation de la porosité des échantillons soumis à une température de 20 °C avec E/C=0.35.....	172
Figure V.14: Variation de la vitesse du son des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec E/C=0.35.....	172
Figure V.15: Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes sous l'effet des cycles gel et de dégel.....	173
Figure V.16: Taux de variation de la masse sous l'influence des cycles de gel et de dégel avec E/C=0.25.....	174
Figure V.17: Résistance mécanique à la compression sous l'effet des cycles gel/dégel avec E/C=0.25.....	174
Figure V.18: Taux de variation de masse sous l'effet des cycles gel/dégel avec E/C=0.3.....	175
Figure V.19: Résistance mécanique à la compression sous l'effet cycles de gel et de dégel avec E/C=0.3.....	175
Figure V.20: Taux de variation de masse sous l'effet des cycles gel/dégel avec E/C=0.35.....	176
Figure V.21: Résistance mécanique à la compression sous l'effet des cycles gel/dégel avec E/C=0.35.....	176
Figure V.22: vitesse du son sous l'effet des cycles gel/dégel.....	178
Figure V.23: Porosité accessible à l'eau sous l'effet des cycles gel/dégel.....	178
Figure V.24: Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes sous l'effet d'une température élevée de 50C°.....	179
Figure V.25: Taux de variation de masse sous l'effet d'une haute température de 50C° avec E/C=0.3.....	180
Figure V.26: Taux de variation de la masse en présence de fumée de silice sous l'influence d'une température élevée de 50 °C avec E/C=0.25, E/C=0.3 et E/C=0.35.....	180

Figure V.27: Résistance mécanique à la compression sous l'effet d'une haute température de 50°C.....	181
Figure V.28: Taux de variation de la résistance mécanique à la compression sous l'influence d'une température élevée de 50°C.....	181
Figure V.29: Evolution de la vitesse du son sous l'effet d'une haute température de 50°C.....	182
Figure V.30: Porosité accessible à l'eau sous l'effet d'une température élevée de 50°C.....	183
Figure V.31: Taux de variation de masse des protocoles utilisés.....	184
Figure V.32: Porosité accessible à l'eau des protocoles utilisés.....	185
Figure V.33: Résistance mécanique à la compression des protocoles utilisés.....	186
Figure V.34: Taux de variation R_c des protocoles utilisés.....	186
Figure V.35: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS après avoir été immergé pendant six mois dans une solution de 5 % de sulfate de magnésium à une température de 20 °C.....	188
Figure V.36: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS après avoir été immergé pendant six mois dans une solution de 5 % de sulfate de magnésium à une température de 20 °C....	189
Figure V.37: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP suite à une immersion de six mois dans une solution de sulfate de magnésium à 5 %, exposée aux variations de gel et de dégel.....	191
Figure V.38: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS suite à une immersion de six mois dans une solution de sulfate de magnésium à 5 %, exposée aux variations de gel et de dégel.....	192
Figure V.39: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS suite à une immersion de six mois dans une solution composée de 5 % de sulfate de magnésium, à une température élevée de 50 °C.....	194
Figure V.40: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS suite à une immersion de six mois dans une solution composée de 5 % de sulfate de magnésium, à une température élevée de 50 °C.....	195
Figure VI.1 : Perméabilité au gaz des six BHP proposés.....	198
Figure VI.2 : Perméabilité au gaz des BHP proposés avec les paramètres de formulation.....	198
Figure VI.3 : Perméabilité au gaz des six BHP proposés avec les valeurs de la résistance moyenne à la compression et porosité accessible à l'eau.....	199

Figure VI.4 : Perméabilité au gaz des six BHP proposés en fonction de la résistance moyenne à la compression.....	200
Figure VI.5 : Perméabilité au gaz des BHP proposés et BHP 2000.....	204
Figure VI.6 : Comparaison de la Perméabilité au gaz des BHP proposés et les BHP 2000 en fonction de la résistance moyenne à la compression.....	205
Figure VI.7 : Détermination de la profondeur de carbonatation en pulvérisant une solution de 1 % de phénolphtaléine à 28 jours, puis à 120 jours.....	205

إهداء

إلي هؤلاء :

إلي روح أبي الزكية

إلي أمي الغالية

إلي إخوتي و أخواتي

إلي كل معارفي .

أهديكم جميعا هذا البحث.

Remerciements

*En premier lieu, je souhaite remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, professeur **NAFA Zahreddine** et professeur **BELAIDI Akram Salah Eddine** pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant mes années de thèse. Je leur exprime ma profonde gratitude pour leur aide précieuse.*

*Je souhaite adresser mes remerciements aux membres du jury professeur **Cheraït Yacine**, professeur **Achoura Djamel**, et professeur **Naceri Abdelghani** pour l'attention qu'ils ont portée à ma recherche et d'avoir accepté de participer à la soutenance.*

Je remercie également l'université de 08 Mai 1945 à Guelma et l'université Amar Telidji à Laghouat, qui m'a accueillie avec bienveillance ces dernières années.

*Je voudrais exprimer mes remerciements à Monsieur **KROBBA Ben Harzallah**. Professeur au niveau de département de génie civil à l'université de Laghouat, pour son aide et conseils tout au long des travaux au laboratoire.*

*Je remercie chaleureusement le laboratoire de génie civil à l'université de Laghouat pour l'assistance technique sur les dispositifs expérimentaux. Je remercie également le **CRAPC** de Laghouat.*

Enfin, j'adresse mes profonds remerciements à mes chers collègues pour leurs soutiens et encouragements pendant la réalisation de ce travail.

ملخص

تُعد المتانة سمة أساسية في دراسة الخرسانة عالية الأداء، إذ لا يكفي صنع خرسانة عالية الأداء في المختبر فحسب، بل من الضروري أيضاً ضمان عدم تدهورها السريع في بيئة هجومية. ولهذا الغرض، تُجرى دراسات عديدة لدراسة تأثير التركيبة على متانة الخرسانة عالية الأداء.

يهدف هذا العمل إلى تحضير خلطات من الخرسانة عالية الأداء، ودراسة آليات تحليلها في المختبر تحت تأثير حمضي الكبريت، الأسيتيك وخليطهما، دراسة متانة الخرسانة عالية الأداء تحت تأثير كبريتات المغنيزيوم، مع الأخذ بالاعتبار تأثيرات التغيرات المناخية، كذلك دراسة نفاذية الغاز و كربنة الخرسانة عالية الأداء. تلخص أهم النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها كما يلي:

-تجاوزت مقاومة الضغط لجميع التركيبات 50 ميغا باسكال بعد 3 أيام من التصلب، وتصل إلى 84.26 ميغا باسكال بعد 28 يوماً، وتتجاوز 100 ميغا باسكال بعد 360 يوماً. أظهرت الخرسانة عالية الأداء مقاومة ممتازة لتأثير حمض الأسيتيك. في المقابل، لوحظ تغير كبير في خصائصها الأولية عند تعرضها لحمض الكبريت وخليط الحمضين.

لوحظ أن مقاومة الخرسانة عالية الأداء المختبرة تحت تأثير مزيج الأحماض مع تأثير دورات التجميد/الذوبان كانت أفضل من مقاومة الخرسانة عالية الأداء المختبرة عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

لوحظ أن معدلات انخفاض المقاومة أعلى تحت تأثير درجة حرارة 50 درجة مئوية مقارنةً بالنتائج التي تم الحصول عليها من العينات المختبرة عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

لوحظ أن تطبيق تأثير كبريتات المغنيسيوم مع التغيرات المناخية على الخرسانة عالية الأداء كان له تأثير كبير.

كذلك لوحظت قيم منخفضة لنفاذية الغاز للخرسانة عالية الأداء. كما وُجدت مقاومة ممتازة لاختراق ثاني أكسيد الكربون للخرسانة عالية الأداء المختبرة، دون اكتشاف أي اختراق ل ثاني أكسيد الكربون.

الكلمات المفتاحية: خرسانة عالية الأداء، تركيب، المتانة، الأحماض، الكبريتات، نفاذية الغاز.

SUMMARY

Durability is a crucial characteristic in the study of high-performance concrete (**HPC**), as it is not enough to produce concrete that performs well in the laboratory; it is also essential to ensure that it does not deteriorate rapidly in an aggressive environment. To this end, several studies are being conducted to investigate the influence of formulation on **HPC** durability.

The objectives of this work are to formulate **HPC** mixes and to study in the laboratory the degradation mechanisms under sulfuric and acetic acids and the mixture of the two, the durability of **HPC** under magnesium sulfates, the effects of climatic conditions, and to study gas transfer, gas permeability, and carbonation. The main results obtained are:

The compressive strength of all compositions at 3 days after hardening exceeds **50 MPa**, at 28 days it reaches **84.26 MPa**, and exceeds **100 MPa** at 360 days. The **HPC** exhibited very good resistance to acetic acid attack. Conversely, a significant change in their initial properties was observed under sulfuric acid and acid mixture attack.

The resistance to combined acid attack under freeze/thaw cycles of the tested **HPC** was found to be better than that of **HPC** tested at 20°C.

At 50°C, the rates of resistance decrease were observed to be higher compared to the results obtained for samples tested at 20°C.

It was found that applying a combination of climatic conditions to magnesium sulfate attack on the **HPC** had a significant effect.

Low gas permeability values were observed in the **HPC**. Excellent resistance to **CO₂** penetration was found in the tested **HPC**, with no carbonate penetration detected.

Keywords: HPC, formulation, durability, acids, sulfates, gas transfer.

RESUME

La durabilité est une caractéristique très importante dans l'étude des bétons à hautes performances **BHP**, car il ne suffit pas de fabriquer un béton qui résiste bien au laboratoire mais il faut s'assurer qu'il ne se détériore pas très vite dans un environnement agressif, à cet effet, plusieurs études sont menées ici et là pour étudier l'influence de la formulation sur la durabilité des **BHP**.

Les objectifs de ce travail est de formuler des **BHP** et d'étudier en laboratoire les mécanismes de dégradations aux acides sulfurique et acétique et le mélange des deux, la durabilité des **BHP** aux sulfates de Magnésium, sous l'effet des conditions climatiques et l'étude de transfert gazeux perméabilité au gaz et carbonatation. Les principaux résultats obtenus sont:

- La résistance à la compression **R_C** de toutes les compositions à 03 jours du durcissement dépasse le **50 MPa**, à 28 jours **R_C** atteint **84.26 MPa** et dépasse le **100 MPa** à l'âge 360 jours.

Une très bonne **R_C** des **BHP** aux attaques par l'acide acétique. Contrairement, une modification remarquable dans les propriétés initiales des **BHP** sous l'attaque par l'acide sulfurique et le mélanges d'acides.

La résistance aux attaques combinés des acides sous l'effet cycles gel/dégel des **BHP** testées a été remarqué meilleurs aux **BHP** testés sous une température de 20C°,

Sous une température de 50C° les taux de diminution de **R_C** ont été remarqués supérieures comparativement aux résultats obtenues pour les échantillons testés sous température de 20C°,

Il a été constaté que l'application de la combinaison des conditions climatiques aux l'attaque du sulfate de magnésium sur les **BHP** à un effet significative,

Des faibles valeurs de perméabilité au gaz des **BHP** ont été remarquées. Une excellente résistance à la pénétration du **CO₂** aux seins des **BHP** testées, dont aucune profondeur carbonatée n'a été détectée.

Mots clés : BHP, formulation, durabilité, Acides, sulfates, transfert gazeux.

1. Introduction générale

Le développement des activités industrielles, agricole, agro-alimentaires, les pluies acides chargées par l'acide sulfurique, les évacuations urbains produisant des effluents de grandes quantités, ces effluents sont chargés surtout par des acides organiques et l'acide sulfurique utilisé pour la fabrication des engrais, utilisé dans l'industrie pétroliers, l'évacuation urbain chargé par l'acide acétique utilisé dans les produits de nettoyage, certains médicaments, les additifs alimentaires et les conservateurs, ces effluents de grandes quantités chargé par l'acide acétique et sulfurique sont parfois stockés avant traitement dans des structures en béton armé, évacués dans la nature et par conséquent infiltrés sous les fondations des structures. Les structures en béton exposés à ces effluents chargés par les acides sont généralement dégradées très rapidement. Les acides acétique et sulfurique sont des environnements agressifs pour la matrice cimentaire et les granulats calcaires, dont le mélange de ces deux types d'acides peut être rencontré dans l'environnement. Les sels qui en résultent se divisent en deux catégories : ceux qui sont solubles, tels que l'acétate de calcium, et ceux qui sont insolubles, comme le sulfate de calcium. L'impact de la combinaison des acides sulfurique et acétique sur un BHP n'a pas encore été examiné. Il est essentiel d'évaluer les propriétés physico-mécaniques et la microstructure des BHP élaborés après l'exposition à ce mélange d'acides.

L'analyse de la résistance des bétons face aux agressions extérieures à travers des tests classiques accélérés en milieu de laboratoire et sous une température de 20°C°, ne reflètent pas à 100% la réalité la durabilité des bétons aux attaques chimiques, notamment les attaques par les acides et les sulfates sans prendre en considération la combinaison des effets climatiques. A cet effet, il est impératif d'optimiser les essais traditionnels en intégrant les variations climatiques lors de l'évaluation de la durabilité des bétons. La présente recherche a été dédiée à l'analyse de la durabilité des bétons haute performance, avec et sans ajout de fumée de silice, face aux effets combinés des acides sulfurique (H_2SO_4) et acétique (CH_3COOH), ainsi qu'aux cycles de gel et de dégel, et sous une température élevée de 50 °C. L'évaluation des BHP concernant les attaques de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) a été discutée. À l'issue de cette étude, la résistance des BHP aux transferts gazeux a été analysée.

La résistance des divers BHP face aux agressions acides et les sulfates dans les protocoles suggérés a été évaluée en observant les variations de masse relatives, résistance mécanique, étude macroscopie (profondeur altérée, porosité et vitesse du son) et en fin une

étude microscopie comporte: une analyse par diffraction des rayons X et analyse par MEB/EDS.

2. Les objectifs visés

L'objectif principal de cette étude est de fabriquer des bétons à hautes performances, tant avec l'ajout de fumée de silice et sans fumée de silice, tout en réalisant des analyses approfondies en laboratoire les mécanismes de dégradations sous l'effet combiné de deux types d'acides sulfurique H_2SO_4 et acétique CH_3COOH , d'étudier la durabilité aux attaques du sulfate de Magnésium MgSO_4 et ce, sous l'effet des conditions climatiques. Les conditions climatiques, telles que des températures de 20 °C, des cycles de gel et de dégel, ainsi qu'une température élevée atteignant 50 °C, ont influencé la réalisation de ces études sur la durabilité des bétons. Cette recherche s'est concentrée sur l'analyse de la durabilité des bétons haute performance (BHP), avec et sans ajout de fumée de silice, en prenant en compte le paramètre de compacité maximale des mélanges granulaires car l'objectif était de réduire la vitesse de pénétration à l'intérieur du béton haute performance, ce qui contribuerait à améliorer la durabilité du matériau, dont la durabilité d'un matériau cimentaire dépend en grande partie de la résistance des agents agressifs à infiltrer dans le réseau poreux. Une étude comparative des résultats a été effectuée pour démontrer l'efficacité de notre formulation de BHP. De plus, il est important de considérer l'évolution de la perméabilité au gaz des bétons à hautes performances, ainsi, d'étudier la diffusion du dioxyde de carbone dans les différentes compositions des bétons à hautes performances formulées.

3. Originalité du travail

Nous pensons que la combinaison d'attaque physico-chimique des bétons, notamment l'attaque de mélange d'acides sulfurique et acétique rencontrer à l'environnement à cause des effluents industriels et agroalimentaires, combinés aux effets climatiques, provoquent des détériorations importantes aux structures en béton. L'étude de la durabilité des BHP aux attaques des mélanges d'acides et aux attaques par les sulfates sous l'effet des effets de gel-dégel et sous l'effet de haute température, n'a pas été prise en considération dans les recherches antérieures. L'originalité de cette recherche consiste à étudier la durabilité BHP aux attaques par une combinaison d'acides sulfurique et acétique sous conditions climatiques simulé aux essais accélérés au laboratoire (effet de gel-dégel et effet de température élevée de 50°C) a été présentée dans cette thèse.

4. Organisation de la thèse

Cette thèse inclut une revue des travaux existants et est structurée en six chapitres, chacun traitant de sujets particuliers en lien avec la durabilité et les processus de dégradation des échantillons en béton à haute performance :

Le chapitre un les revues bibliographiques sont présentées au chapitre 1 Ce chapitre aborde diverses méthodes de formulation des bétons à hautes performances à l'échelle mondiale, ainsi que les problèmes environnementaux, notamment les agressions des matériaux cimentaires par les acides et les sulfates, ainsi les mécanismes de transfert gazeux (perméabilité aux gaz et carbonatation). Des nombreuses recherches sont exposées dans ce chapitre.

Le chapitre deux décrit les différentes techniques expérimentales et les protocoles adoptés dans la caractérisation des matériaux employés et dans l'analyse de la durabilité des formulations des BHP proposées.

Le chapitre trois Inclut la formulation de diverses compositions des bétons à hautes performances. Ainsi, l'étude comparative à la fin de cette étude est effectuée entre nos BHP ainsi que celles énoncées dans le cadre du projet national français BHP 2000.

Le chapitre quatre aborde (i) l'étude de la durabilité BHP, tant avec que sans fumée de silice, en examinant les effets des deux types d'acides, à savoir l'acide sulfurique H_2SO_4 et l'acide acétique CH_3COOH . (ii) Il traite également de la durabilité des BHP, avec et sans fumée de silice, en étudiant les effets du mélange d'acides sulfurique H_2SO_4 et acétique CH_3COOH , en utilisant une solution à 5% de H_2SO_4 et 5% de CH_3COOH à une température de 20°C. (iii) Enfin, une étude de la durabilité des BHP, avec et sans fumée de silice, en analysant les effets du mélange d'acides sulfurique H_2SO_4 et acétique CH_3COOH sous l'effet combiné des cycles gel/dégel et sous l'effet d'une température élevée de 50°C.

Le chapitre cinq se concentre sur (i) l'évaluation de la durabilité des BHP, avec ou sans fumée de silice, face aux agressions externes du sulfate de magnésium $MgSO_4$, dans une solution à 5% à une température de 20°C. (ii) Il examine également la durabilité des BHP, avec et sans fumée de silice, sous l'effet du sulfate de magnésium $MgSO_4$, en prenant en compte les effets des cycles de gel et de dégel et effet d'une température élevée de 50°C.

Le chapitre six est consacré à l'étude de la durabilité des bétons à hautes performances face au transfert gazeux. Des formulations de bétons à hautes performances, avec et sans incorporation de fumée de silice, sont élaborées puis la perméabilité au gaz est mesurée conformément la norme XP P18-463. Ce chapitre se termine par une présentation de l'étude concernant la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation.

Conclusions générale est présentée à la fin de la thèse.

Plan d'expérience :

1. Essais de l'attaque unique de l'acide sulfurique et l'acide acétique ;
2. Essais de l'attaque par un mélange d'acides sous une température ambiante 20C° ;
3. Essais de l'attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel ;
4. Essais de l'attaque par un mélange d'acides sous une température élevée de; 50C° ;
5. Essais de l'attaque par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous une température ambiante 20C° ;
6. Essais de l'attaque par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous l'effet des cycles gel/dégel ;
7. Essais de l'attaque par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous l'effet d'une température élevée de 50C° ;
8. Essais de la perméabilité au gaz de béton durci ;
9. Essais de la carbonatation accélérée.

I.1 Introduction

Cette revue bibliographique est organisée en quarts parties :

La première partie : la première partie aborde un résumé de plusieurs techniques de formulation des bétons à hautes performances, notamment la méthode américaine proposée par le comité ACI 363 en 1993, la méthode simplifiée de Mehta et Aitcin, ainsi que la méthode développée à l'université de Sherbrooke.

La deuxième partie : examinera les mécanismes d'altération physico-chimiques des matrices cimentaires par les différents types d'acides. Elle présentera également les performances de différents matériaux cimentaires en milieux acides.

La troisième partie : est consacrée à la durabilité des bétons aux sulfates :

Quatrième partie : transfert gazeux : la perméabilité est un indicateur majeur pour apprécier la résistance d'un béton face à l'infiltration des agents agressifs. Cette partie met en lumière la mesure de la perméabilité aux gaz ainsi que les divers résultats obtenus par les chercheurs, en particulier concernant les bétons à hautes performances. Ainsi, nous traiterons de la carbonatation des matériaux cimentaires dans la dernière section de ce chapitre.

I.2 Formulation des BHP

Comment obtenir un béton à haute performance ? Les travaux de recherches montrent que l'eau non hydratée et qui est nécessaire pour l'obtention d'une bonne ouvrabilité du béton à l'état frais, a un impact négatif sur la résistance mécanique et la durabilité du béton. Il est donc crucial d'améliorer ces propriétés, il faut réduire le dosage en eau. La solution consiste à recourir à un superplastifiant, dont l'effet est d'augmenter la fluidité du béton sans nécessiter d'ajout d'eau. Certains chercheurs se sont attachés à reconstituer une roche massive à partir de l'obtention, lors de la composition du béton, d'un mélange de très haute compacité. L'usage de particules ultrafines, telles que la fumée de silice et les fines calcaires, qui sont chimiquement réactives, destinés à remplir les vides et d'améliorer la compacité du mélange. Donc ces deux axes à considérer sont l'emploi de superplastifiants pour la défloculation des particules de ciment et l'utilisation d'ultrafins pour optimiser la compacité du mélange ; se sont dégagées pour créer un béton à hautes performances caractérisé par une fluidité à l'état frais et une microstructure très dense comparativement au béton conventionnel, il affiche une résistance supérieure à la compression et à la traction, caractérisée par une $R_{C28j} \geq 60 \text{MPa}$ et un rapport $E/C < 0.4$ [3] [7] [62]. Les figures I.1 et I.2 représentent les images réalisées par MEB sur un échantillon de béton M 25CV et un BHP M 120 FS (M 25 CV : béton de 25 MPa de résistance contenant de la cendre volante ; BHP M120 FS : béton de HP de 120 MPa de résistance contenant de la fumée de silice.

. Une compacité importante de BHP M 120 FS comparativement au M 25CV a été observée selon les images de MEB figures I.1 et I.2 [7].

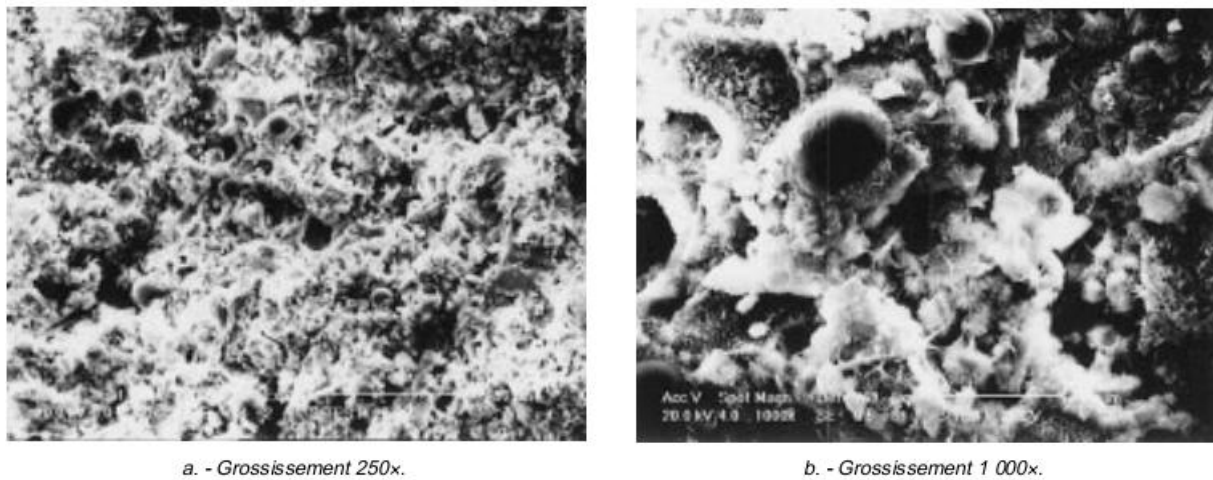


Figure I.01 : Représentations obtenues par MEB sur un échantillon de béton M 25 CV [7].

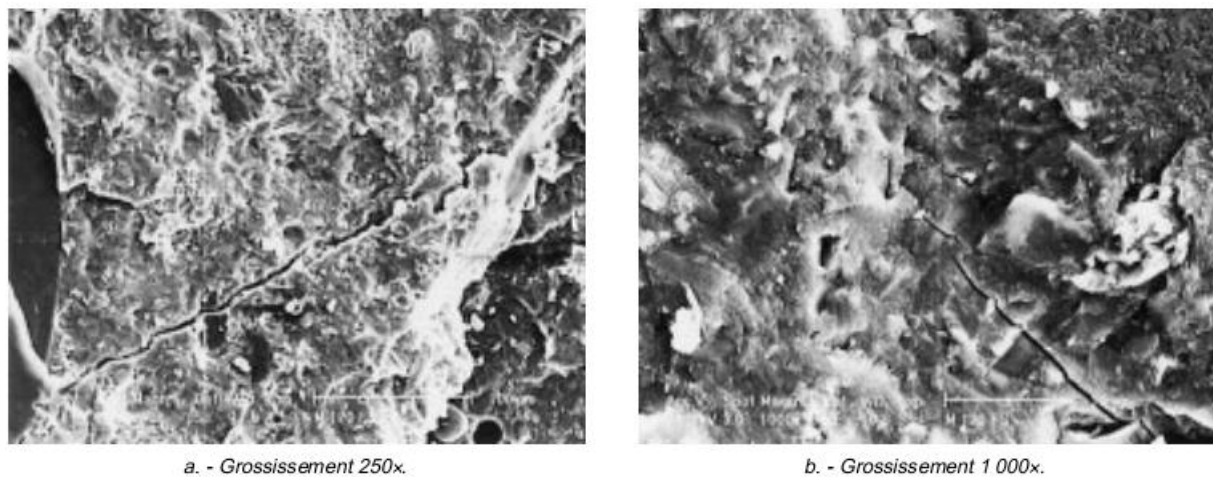


Figure I.02: Représentations obtenues par MEB sur un échantillon de BHP M 120 FS [7].

À travers le monde, diverses méthodes sont utilisées pour la formulation des BHP, telles que la méthode américaine, la méthode de Mehta et Aitcin, et la méthode développée par l'université de Sherbrooke. Un aperçu des étapes à suivre pour chacune de ces méthodes est exposé dans ce qui suit:

I.2.1 METHODE AMERICAINE :

Cette méthode a été proposée par le comité **ACI 363** en 1993[01] [02] elle comporte les étapes suivantes :

Étape 1 : Détermination de l'affaissement et de la résistance exigés : Un tableau indique les valeurs d'affaissement des bétons, qu'ils contiennent ou non des superplastifiants. Avant

l'ajout de ces derniers, la première valeur d'affaissement doit être comprise entre 25 et 50 mm pour garantir une quantité d'eau suffisante.

Étape 2 : Choix de diamètre maximale des gros granulats (GG) La méthode recommande d'utiliser des gros granulats de 19 ou 25 mm de diamètre pour les bétons ayant une résistance à la compression inférieure à 65 MPa, et de 10 ou 13 mm de diamètre pour ceux dont la résistance est supérieure à 85 MPa. Il est également permis d'employer des gros granulats de 25 mm de diamètre pour des bétons ayant une résistance à la compression comprise entre 65 et 85 MPa, à condition que les granulats soient de haute qualité. Comme pour le béton traditionnel, la taille des GG ne doit pas excéder un cinquième de la plus petite dimension des coffrages, un tiers de la profondeur de la dalle, ou les trois quarts de l'espacement minimal entre les barres d'armature, les faisceaux ou les câbles.

Étape 3 : Choix de la proportion de granulats grossiers Cette approche indique que la proportion optimale de granulats grossiers, exprimée en pourcentage du poids volumique sec, est de 0,65, 0,68, 0,72 et 0,75 pour des granulats ayant des diamètres maximaux de 10, 13, 20 et 25 mm, respectivement. La masse volumique est déterminée selon la norme ASTM C29, qui est la méthode d'essai standard pour le poids volumique et les vides dans les granulats. Ces valeurs s'appliquent à un béton élaboré avec un sable dont le module de finesse se situe entre 2,5 et 3,2.

Étape 4 : Évaluation de la teneur en eau libre et en air : Un tableau présente des estimations concernant la quantité d'eau nécessaire et la teneur en air occlus pour les bétons élaborés avec des granulats de différentes tailles. Ces estimations de la teneur en eau sont basées sur un granulat fin ayant un indice de vides de 35 %. Si cet indice diffère de 35 %, il convient d'ajuster la teneur en eau indiquée dans le tableau en ajoutant ou en soustrayant 4,8 kg/m³ pour chaque variation de 1 % de l'indice de vides du sable.

Étape 5 : Choix du rapport E/L : Deux tableaux présentent les valeurs E/L pour les bétons contenant un superplastifiant, afin de garantir les résistances à la compression requises à 28 et 56 jours. Ces valeurs dépendent de la taille des granulats et des résistances à la compression du béton.

Étape 6 : Teneur en ciment : Pour calculer la masse de ciment, il convient de diviser la masse d'eau libre par le rapport E/L.

Étape 7 : Premier essai de mélange avec du ciment : Le premier mélange à analyser peut être réalisé uniquement avec du ciment, sans l'ajout d'autres matériaux cimentaires. La quantité de sable est ensuite déterminée en utilisant la méthode du volume absolu.

Étape 8 : Autres mélanges d'essai avec un remplacement partiel du ciment : Il est recommandé d'utiliser au moins deux proportions différentes de ciment pour substituer une partie de la masse totale de ciment, permettant ainsi la création de nouveaux mélanges d'essai à doser et à évaluer. Des limites maximales de substitution du ciment sont proposées pour les cendres volantes et le laitier de haut fourneau ; aucune limite n'est proposée pour la fumée de silice, car cette méthode est applicable jusqu'à une résistance à la compression maximale de 85 MPa. Les limites sont fixées entre 15 et 25 % de la masse de ciment pour les cendres volantes de classe F, entre 20 et 35 % pour celles de classe C, et entre 30 et 50 % pour le laitier de haut fourneau. La masse du sable est déterminée selon la méthode du volume absolu.

Étape 9 : essais de gâchage La quantité de granulats et celle de l'eau de gâchage sont adaptées en fonction des conditions d'humidité réelles. Des essais sont effectués avec uniquement du ciment, ainsi qu'avec des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau. Les formulations de béton sont ensuite modifiées pour atteindre les propriétés physiques et mécaniques requises.

1.2.2 METHODE SIMPLIFIE DE MEHTA ET AITCIN[02] :

La méthode simplifiée de Mehta et Aïtcin (1990) ont développé une approche simplifiée pour la formulation des bétons de masse volumique normale, dont la résistance à la compression varie entre 60 et 120 MPa. Cette méthode est adaptée aux granulats de grande taille, avec un diamètre maximal de 10 à 15 mm, et un affaissement se situant entre 200 et 250 mm. Elle postule que le béton hautes performances sans air occlus contient un volume d'air occlus de 2 %, pouvant atteindre 5 ou 6 % lorsque le béton est à air occlus. Le volume optimal de granulats est évalué à 65 % du volume total du béton hautes performances. Les étapes de cette méthode sont les suivantes :

Étape 1 : Évaluation de la résistance : Un tableau présente cinq types de béton, dont la résistance moyenne à la compression après 28 jours se situe entre 65 et 120 MPa.

Étape 2 : Teneur en eau : Dans cette phase, le diamètre maximal des gros granulats ainsi que les valeurs d'affaissement ne sont pas considérés pour déterminer la teneur en eau. Seuls les diamètres maximaux variant de 10 à 15 mm sont pris en compte, et l'affaissement désiré, compris entre 200 et 250 mm, peut être atteint en ajustant le dosage du superplastifiant. La teneur en eau est définie pour diverses catégories de résistance.

Étape 3 : Choix du liant : On estime que le volume de pâte liante doit représenter 35 % du volume total du béton. Pour calculer le volume de liant restant, il est nécessaire de soustraire les volumes d'air (qu'il soit emprisonné ou entraîné) et d'eau de gâchage du volume total de pâte de ciment. Le liant peut être constitué de l'une des trois combinaisons suivantes : 1 : 100 % de ciment Portland, à utiliser uniquement en cas d'absolue nécessité. 2 : 75 % de ciment Portland et 25 % de cendres volantes ou de laitier de haut fourneau. 3 : 75 % de ciment Portland, 15 % de cendres volantes et 10 % de fumée de silice. Un tableau indique le volume de chaque fraction de liant pour chaque classe de résistance.

Étape 4 : Détermination de la teneur en granulats Le volume global des granulats constitue 65 % du volume du béton. Concernant les classes de résistance A, B, C, D et E, les proportions volumiques entre granulats fins et granulats grossiers sont de 2,00:3,00, 1,95:3,05, 1,90:3,10, 1,85:3,15 et 1,80:3,20.

Étape 5 : Calcul des masses : Le poids volumique du béton peut être déterminé en utilisant les fractions volumiques des différents composants du béton ainsi que les valeurs de densité de chacun d'eux. Les densités standards pour le ciment Portland, les cendres volantes de type C, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice sont respectivement de 3,14, 2,5, 2,9 et 2,1. Pour le sable siliceux naturel, le gravier normal ou les roches concassées, les valeurs de densité sont généralement de 2,65 et 2,70. Un tableau présente les proportions de mélange calculées pour chaque type de béton et classe de résistance recommandés dans cette méthode.

Étape 6 : Taux de superplastifiant : Pour le premier mélange d'essai, il est suggéré d'utiliser un liant avec un total de 1 % de superplastifiant. La masse et le volume de la solution de superplastifiant doivent ensuite être calculés en fonction du pourcentage de solides dans la solution et de la densité du superplastifiant (une valeur de 1,2 est généralement recommandée pour le superplastifiant polynaphtalène).

Étape 7 : Ajustement de l'humidité : La quantité d'eau présente dans le superplastifiant est déterminée et déduite de la quantité d'eau de gâchage prévue. Parallèlement, la masse des granulats et de l'eau est modifiée en fonction des conditions d'humidité, entraînant un ajustement de la quantité d'eau de gâchage.

Étape 8 : Ajustement pour un gâché d'essai : Étant donné les nombreuses hypothèses considérées lors de la sélection du dosage du mélange, il est souvent nécessaire de modifier le premier mélange d'essai pour atteindre les critères d'ouvrabilité et de résistance souhaités. Les

caractéristiques des granulats, les proportions de sable et de granulats, le type et la quantité de superplastifiant, ainsi que le type et la combinaison des ajouts cimentaires, sans oublier la teneur en air du béton, peuvent être ajustés au cours d'une série de gâchés d'essai afin d'optimiser le dosage du mélange.

I.2.3 METHODE DE FORMULATION DE L'UNIVERSITE DE SHERBROOKE [02] :

La méthode de formulation des BHP, élaborée à l'université de Sherbrooke, se distingue par sa simplicité et s'aligne sur l'approche de la norme américaine [ACI 211-1](#). Elle repose sur une combinaison de résultats empiriques et de calculs fondés sur la méthode des volumes absolus. Les étapes suivantes en détaillent le processus :

Première étape : sélection du rapport E/L : Le rapport eau/liant recommandé est représenté dans la figure a, en fonction d'une résistance à la compression de 28 jours spécifiée (mesurée sur des cylindres de 100×200 mm). En raison des différences de résistance entre les divers ajouts cimentaires, la courbe de la figure I.3 présente une large gamme de valeurs pour le rapport eau/liant à résistance équivalente. Si l'efficacité des différents ajouts cimentaires n'est pas connue par des expériences antérieures, la courbe moyenne peut être utilisée pour fournir une première estimation des proportions du mélange.

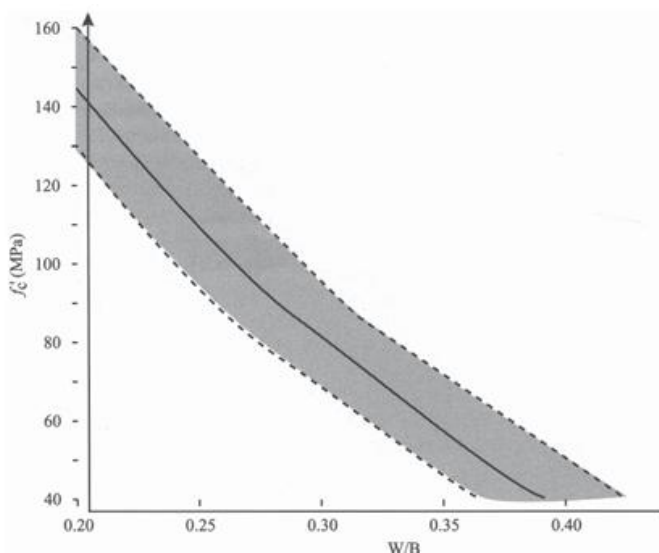


Figure I.3 : Relation proposée entre la résistance à l'eau et la résistance à la compression

Deuxième étape : Teneur en eau : pour la conception de mélanges des bétons à hautes performances, il est complexe de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement de 200 mm une heure après le mélange. L'ouvrabilité du mélange est influencée par divers facteurs, notamment la quantité d'eau initiale, la réactivité du ciment, ainsi que la

quantité et la compatibilité du superplastifiant utilisé. Ainsi, un affaissement de 200 mm peut être atteint soit avec un faible dosage en eau et un dosage élevé en superplastifiant, soit avec un dosage en eau plus important et un dosage réduit en superplastifiant. Sur le plan économique, la différence entre ces deux approches est minime, mais sur le plan rhéologique, elle peut être significative, en fonction de la réactivité du ciment et de l'efficacité du superplastifiant. En raison des variations de finesse, de composition des phases, de réactivité et de solubilité du sulfate de calcium dans les ciments, la quantité d'eau minimale requise pour obtenir un béton hautes performances avec un affaissement de 200 mm peut varier considérablement. Si la quantité d'eau choisie est trop faible, le mélange risque de devenir collant, et l'utilisation d'une grande quantité de superplastifiant pour atteindre cet affaissement élevé peut entraîner un retard de prise. La manière optimale de déterminer la combinaison idéale d'eau de gâchage et de dosage du superplastifiant consiste à effectuer un essai factoriel (Rougeron et Aïtcin, 1994). Néanmoins, cette méthode peut s'avérer peu pratique. Ainsi, une approche simplifiée, fondée sur le concept de point de saturation, est illustrée à la figure I.4. Pour élaborer un mélange très fiable, il est recommandé d'ajouter 5 l/m³ d'eau aux valeurs indiquées à la figure b. En l'absence de connaissance du point de saturation du superplastifiant, il est conseillé de débiter avec une teneur en eau de 145 l/m³.

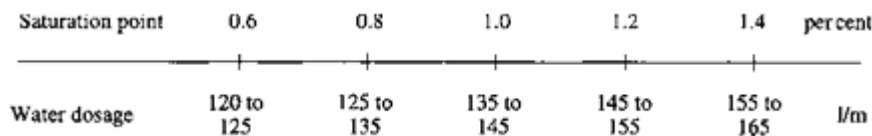


Figure I.4 : Détermination du dosage minimal d'eau

Troisième étape : Dosage du superplastifiant : Le dosage du superplastifiant peut être déterminé à partir du dosage au point de saturation. En l'absence de connaissance du point de saturation, il est recommandé de débiter avec un dosage d'essai de 1,0 %.

Quatrième étape : Contenu de gros granulats : La quantité grosse granulats est établie à partir de la figure I.5, en tenant compte de la forme caractéristique des particules. Si la forme des granulats grossiers suscite des interrogations ou si elle est indéterminée, une valeur de 1 000 kg/m³ de granulats grossiers peut être adoptée comme référence.

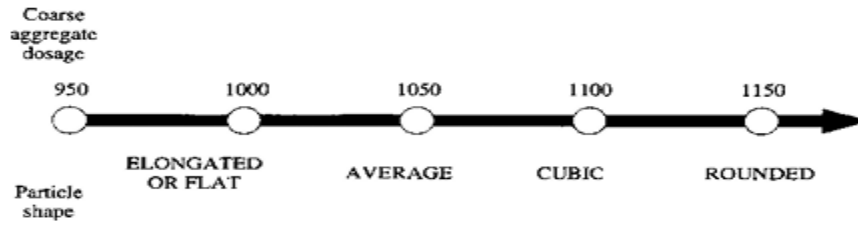


Figure I.5 : Contenu de gros granulats.

Cinquième étape : Teneur en air : Dans le cas des bétons à haute performance conçus pour des environnements non soumis au gel, la présence d'air occlus n'est pas strictement requise. Ainsi, l'air contenu dans le mélange se limite à l'air occlus, dont le volume est partiellement déterminé par les proportions du mélange. Dans le processus de fabrication de bétons à hautes performances, caractérisés par des rapports eau/liant très faibles, il a été constaté que les différentes combinaisons de ciment et de superplastifiant n'entraînent pas toutes le même niveau d'occlusion d'air. De plus, certaines bétonnières semblent capturer davantage d'air que d'autres. Les expériences réalisées indiquent qu'il est difficile d'atteindre une teneur en air occlus inférieure à 1 %, et dans les cas les plus défavorables, cette teneur peut atteindre jusqu'à 3 %. Ainsi, l'auteur recommande d'adopter une estimation initiale de 1,5 % pour la teneur en air emprisonné, à ajuster par la suite en fonction des résultats obtenus lors des essais de mélange. Néanmoins, pour optimiser la maniabilité, l'application et la finition du béton, l'auteur préconise vivement l'incorporation d'une quantité appropriée d'air occlus.

I.2.4 METHODE DES COULIS [4] et [2] : Le but fondamental de la méthode des coulis est de déterminer expérimentalement le dosage optimal en super-plastifiant (dose de saturation). Comme règle générale, l'essai est réalisé avec un rapport E/C qui varie entre 0.3 à 0.4. Pour la composition de coulis, en utilisant uniquement le ciment, eau et le super-plastifiant avec des pourcentages variés. Il existe deux méthodes principales pour déterminer la dose de saturation :

I.2.5 METHODE DE MINI CONE [2] : Le fondement de cette méthode repose sur l'évaluation de l'étalement du coulis voir figure I.06.



Figure I.06: Mine cône

I.2.6 METHODE DU CONE MARSH : L'essai se fonde sur la préparation d'un volume spécifique de coulis, dont le temps d'écoulement est ensuite mesuré, comme le montre la figure I.07.

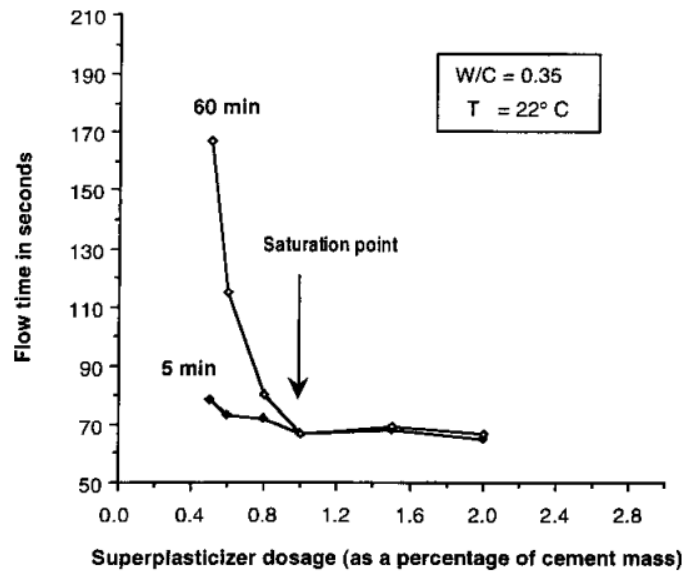


Figure I.07 : Détermination de la dose de saturation.

I.2.7 METHODE DES COULIS PROPOSEE PAR LCPC [4], [2] :

Il s'agit d'une méthode innovante de formulation des coulis, présentée par le groupe l'AFREM du LCPC, destinée à l'élaboration des BHP. La composition des coulis est dérivée de celle du béton, en excluant tous les composants dépassant 2 mm..

- Dosage de saturation noté x_s :

- Représenter les points expérimentaux de la courbe $\text{Log } t$ en fonction des concentrations de superplastifiant (extrait sec) figure I.08.
- Tracer une droite D de la pente 2/5 et dessiner les droites D_i parallèles à la droite D et tangentes à la ligne brisée. Les abscisses des points de tangente, désignées par x_i , représentent la dose de saturation x_s :

$$x_s = \sup(x_i)$$

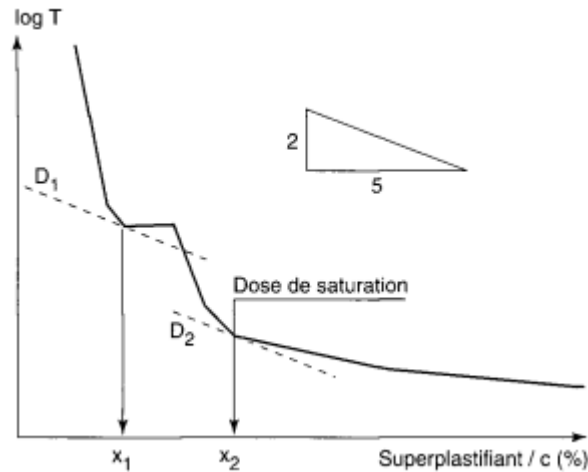


Figure I.08 : dosage de saturation selon le groupe l'AFREM de LCPC.

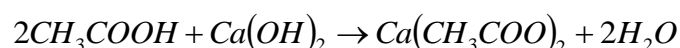
I.3 Durabilité des bétons aux attaques des acides :

À l'échelle mondiale, une intensification des dommages aux structures en béton par les acides a été relevée, conséquence de l'augmentation des sources d'environnements acides, provoquée par l'évolution des activités urbaines et industrielles. Les milieux acides peuvent provenir de l'agriculture. Vu que les matériaux cimentaires sont très fragiles lorsqu'ils sont exposés à des environnements acides. L'étude des impacts des acides sur les structures en béton est un sujet d'une grande importance (RILEM TC 211 – PAE 2013[08], V. Zivica 2001[09]).

La corrosion du béton par les acides se présente sous la forme d'une décomposition des produits d'hydratation, entraînant la formation de nouveaux composés, qu'ils soient solubles ou insolubles. Les pluies acides, riches en acide sulfurique H_2SO_4 et en acide nitrique, engendrent des détériorations des surfaces du béton exposées A. NEVILLE [10]. En outre, l'acide sulfurique peut produire par la transformation du sulfate en H_2S (très toxique) par les bactéries anaérobies et en acide sulfurique H_2SO_4 par les bactéries aérobies [11]. Le H_2SO_4 provoque des corrosions sévères dans le béton. La production de H_2SO_4 a été constaté aussi dans une conduite d'évacuation des eaux usées ou industrielles. Les sols contenant des schistes argileux pyriteux provoquent des gonflements importants et le dégagement de l'acide sulfurique H_2SO_4 Sherbrooke GCI 714[11].

I.3.1 Les réactions chimiques:

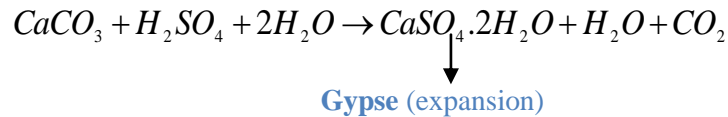
- ACIDE ACETIQUE



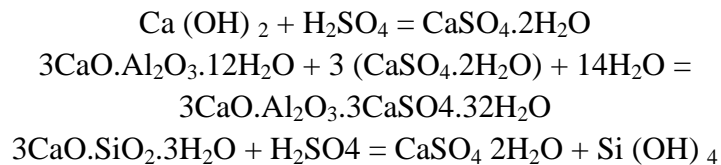
Le produit obtenu est le sel d'acétate de calcium, qui présente une grande solubilité dans l'eau, entraînant ainsi une augmentation de la porosité avec une altération des propriétés de béton ont été observés. On peut citer quelques acides qui fonctionnent sur ce modèle l'acide lactique et l'acide formique qui proviennent de l'industrie agroalimentaire **Sherbrooke GCI 714[11]**.

- ACIDE SULFURIQUE H_2SO_4 :

L'attaque de la calcite $CaCO_3$ par l'acide sulfurique



Monteny et al [12] ont caractérisé l'attaque à l'acide sulfurique par les réactions chimiques suivantes:



I.3.2 Revues bibliographies :

N. De Belie et al Mai 1997[13], ont montré dans une recherche l'effet des acides organiques, à savoir l'acide acétique et l'acide lactique, sur des échantillons de béton et de mortier composés de ciment ordinaire et de ciment à haute résistance, avec et sans incorporation de cendre volante, a été étudié. Trois niveaux d'acidité des solutions ont été sélectionnés afin de déterminer la résistance aux attaques chimiques : PH=2.1, PH=3.8 et PH=4.5. Les résultats indiquent que l'incorporation de 7 à 10 % de cendre volante dans les trois environnements acides réduit la dégradation des échantillons de bétons et mortiers, ainsi, l'impact bénéfique de l'incorporation de cendres volantes peut être attribué à la réaction pouzzolanique, cela se manifeste par une diminution du $Ca(OH)_2$. La réduction de dégradation est remarquable pour les échantillons à base du ciment HSR (0% C_3A).

Achoura. D et al [14], ont examiné la résistance des mortiers contenant du laitier de haut fourneau face à divers types d'acides, tant forts que faibles, notamment l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide phosphorique (H_3PO_4) et l'acide acétique (CH_3COOH). Les échantillons de mortiers ont été plongés dans les solutions d'acide durant trois mois et avec une concentration d'acides variable. Les résultats indiquent une diminution de la résistance mécanique à la compression dans l'ensemble des compositions, Le taux

maximal de réduction a été observé dans les échantillons plongés dans une solution d'acide sulfurique, suivi par ceux traités avec de l'acide chlorhydrique (HCl), de l'acide phosphorique (H_3PO_4) et enfin de l'acide acétique (CH_3COOH). Ce phénomène est significatif uniquement à des concentrations élevées des acides. À des concentrations plus faibles, les acides forts H_2SO_4 et HCl se comportent de manière similaire aux acides plus faibles H_3PO_4 et CH_3COOH . Les agressions causées par l'acide sulfurique entraînent la production de gypse et d'étringite. De plus, l'attaque de l'acide chlorhydrique (HCl) génère du chlorure de calcium et de l'hydroxyde de fer. L'interaction avec l'acide acétique produit de l'acétate de calcium, tandis que l'acide phosphorique (H_3PO_4) conduit à la formation de phosphate de calcium.

A. Bertron et al [15], ont examiné les mécanismes de dégradation des matrices cimentaires, en se concentrant sur le ciment ordinaire CEM I 52.5 et un ciment CEM III/B 42.5 contenant 68 % de laitier. Leur étude a impliqué des mélanges de cinq acides organiques : acétique, propénoïque, butyrique, iso-butyrique et acide valérique, dans deux solutions d'acides organiques avec un pH de 4 et 6, sur une période de 18 semaines. À la suite de l'analyse effectuée sur les pâtes à base du ciment Portland ordinaire et les pâtes de ciment contenant du laitier, ils ont été observés que la cinétique d'altération, mesurée par les pertes de masse et les profondeurs d'altération, des échantillons immergés dans une solution à pH 4 était neuf fois supérieure à celle des échantillons dans une solution à pH 6.

Véronique Baroghel -Bourry [16], a contribué au projet National 2000, qui a permis d'évaluer la durabilité des BHP. Cette évaluation a été réalisée grâce à des essais accélérés en laboratoire des échantillons ont été immergés dans la solution composée de deux types d'acides organiques (l'acide acétique et l'acide lactique) durant 175 jours avec un PH=4. La recherche montre que la perte relative de masse n'excédait pas le 0.5% pour deux BHP de composition différente : 1 : Ciment CEM I 52.5, E/C=0.36, FS/C=0.06 et résistance à la compression à l'âge de 28 jours égal à 68 MPa 2 : Ciment CEM V 42.5, E/C=0.28, et résistance à la compression à l'âge de 28 jours égal à 79 MPa.

S TURKEL et al [17], ont étudié la durabilité aux attaques par l'acide chlorhydrique HCL , nitrique HNO_3 et sulfurique H_2SO_4 dans un intervalle de 120 jours. Cela concerne deux catégories de mortiers composés de ciment CEM I 32.5 et CEM IV 32.5, élaborés à partir de cendres volantes et de sable naturel provenant des rivières. Le niveau d'acidité est également varie (0.05M, 0.077M et 0.125M). Les résultats de cette étude indiquent que la diminution de la masse des mortiers s'accroît en fonction de la concentration de la solution acide. Il a été

observé que ces pertes sont similaires pour l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique, les valeurs de pertes de masses minimales ont obtenues par l'attaque sulfurique, Cela est attribué à l'insolubilité du gypse. En outre, les mortiers à base de ciment contenant de la cendre volante CEM IV 32.5 montrent une diminution de masse plus importante que celle observée dans les mortiers à base de ciment ordinaire CEM I 32.5.

Shweta Goyal et al [18], ont réalisé une étude sur la durabilité des BHP lorsqu'ils sont exposés à trois types d'acides : l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide nitrique (HNO_3), avec une concentration de 1% sur une durée d'un an. Les BHP élaborés avec ou sans l'ajout de fumée de silice, de cendre volante, ainsi qu'avec des granulats concassés de type granit de $D_{max}=10mm$ et un sable naturel provenant des rivières, le rapport E/C varie 0.25-0.45. La résistance chimique aux acides dans cette étude a été déterminée par le suivi des pertes relatives en masses et résistance mécanique à la compression. Selon les résultats obtenus à l'issue de cette étude **Shweta Goyal et al** ont constaté que la perte de masse n'est pas un indice fiable pour mesurer la durabilité du béton par l'attaque aux agressions d'acides, il est nécessaire de compléter cette mesure par des études portant sur la résistance. L'incorporation de fumée de silice et de cendres volantes contribue à réduire les impacts négatifs de tous les types d'acides sur le béton. Les mélanges ternaires, composés de ciment, de fumée de silice et de cendre volante, offrent une meilleure résistance aux agressions acides par rapport aux mélanges binaires qui ne contiennent que de la fumée de silice. De plus, une réduction du rapport eau/ciment renforce également cette résistance. En outre l'attaque acide est conditionnée par la nature de l'acide impliqué. Lors d'une attaque par l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique, le sel de calcium résultant se dissout dans l'eau, ce qui entraîne une perte de masse plus élevée. Tandis, dans le cas d'une attaque à l'acide sulfurique, le sel de calcium formé est insoluble dans l'eau, il se dépose dans les cavités, engendrant des contraintes internes qui entraînent une rupture et une diminution de la résistance de la matrice.

Steevs Larreur Cayol et al [19], s'intéresse sur l'étude des attaques des matériaux cimentaires par les acides organiques : l'acide acétique, succinique, malique, tartrique, oxalique et citrique, ainsi sur deux types de mélanges d'acides : le premier étant un mélange d'acide acétique et d'acide oxalique, et le second un mélange d'acide acétique, d'acide citrique et d'acide oxalique. L'évaluation de la vitesse de dégradation des échantillons immergés dans les différentes solutions à base d'acides organiques a été déterminée par les pertes relatives de masses et la profondeur dégradée. L'étude montre que degré de dégradation maximale est

constaté dans les échantillons plongés dans une solution d'acide citrique. La dégradation de l'acide oxalique ainsi que de deux mélanges d'acides: acétique/ oxalique et acétique/citrique/oxalique a été remarqué presque nul. Le classement des différents types d'acides en termes de degré d'agressivité sur les échantillons testés est présenté ci-après :

Acide citrique > Acide succinique > Acide acétique > Acide malique > Acide oxalique = mélange d'acides acétique/acide oxalique= mélange d'acides acétique/citrique/oxalique.

DJERFAF.N [20], a étudié la durabilité la résistance des BHP à base de sable concassé face aux attaques d'acide sulfurique H_2SO_4 , en remplaçant une partie du sable par des fines de calcaire. Six formulations de BHP ont été immergées dans une solution d'acide sulfurique durant quatre mois. La résistance aux agressions causées par l'acide sulfurique est évaluée par l'analyse de la perte relative de masse, la résistance mécanique à la compression et à la flexion, ainsi que par des études ultrasoniques. D'après les résultats, la perte relative de masse pour la plupart des compositions de BHP ne dépasse pas 4 % à la fin d'essai. Aucune dégradation n'a été observée à l'intérieur des échantillons. La dégradation apparaît uniquement à la surface, l'épaisseur de pénétration mesurée ne dépasse pas 1mm. Une diminution de la résistance à la compression a été observée dans l'ensemble des compositions testées, elle atteint le 12%. L'analyse par diffraction des rayons X montre une cristallisation du sulfate de calcium (gypse) et la **Thaumasite** $Ca_3.Si(OH).(SO_4).(CO_3).12H_2O$ dans toutes les compositions du béton proposées.

Y.F. Fan et al 2012[21], ont étudiés le comportement de béton en traction sous l'effet des pluies acides simulé par un mélange d'acide sulfurique H_2SO_4 et un acide nitrique HNO_3 . Des échantillons ont été exposés à une solution d'acide de pH 1 pendant une période de 70 jours. La résistance chimique des bétons a été mesurée par l'évaluation des pertes de masse, la résistance à la traction, ainsi qu'une analyse microscopique SEM/EDS. La **figure I.09** montre l'aspect des éprouvettes après l'attaque.

Les résultats indiquent que les pertes de masse relatives s'accroissent progressivement en fonction du temps d'immersion dans la solution corrosive. De plus, une légère augmentation de la résistance mécanique à la traction a été observée jusqu'à dix jours d'immersion. Cependant, au-delà de cette période, une diminution de la résistance à la traction a été notée avec le temps, comme le montre la **figure I.10**.

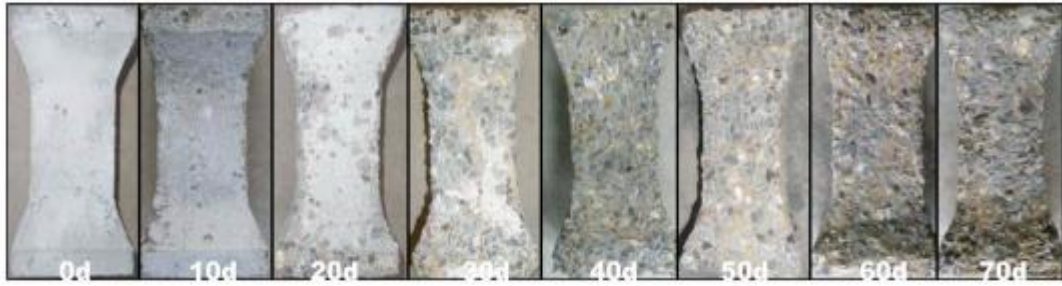


Figure I.09: État de la surface d'un échantillon de béton soumis à une solution acide lors de différentes phases **Y.F. Fan et al.**

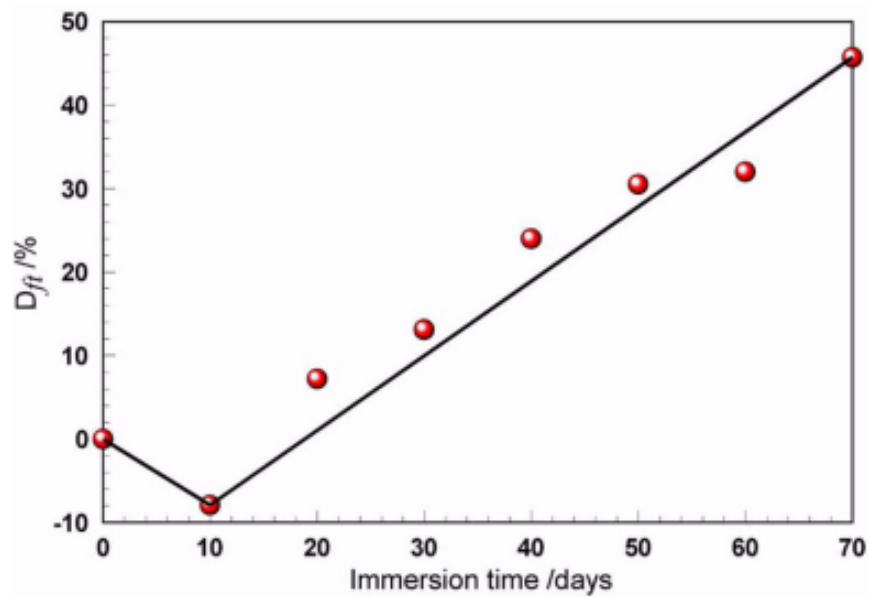
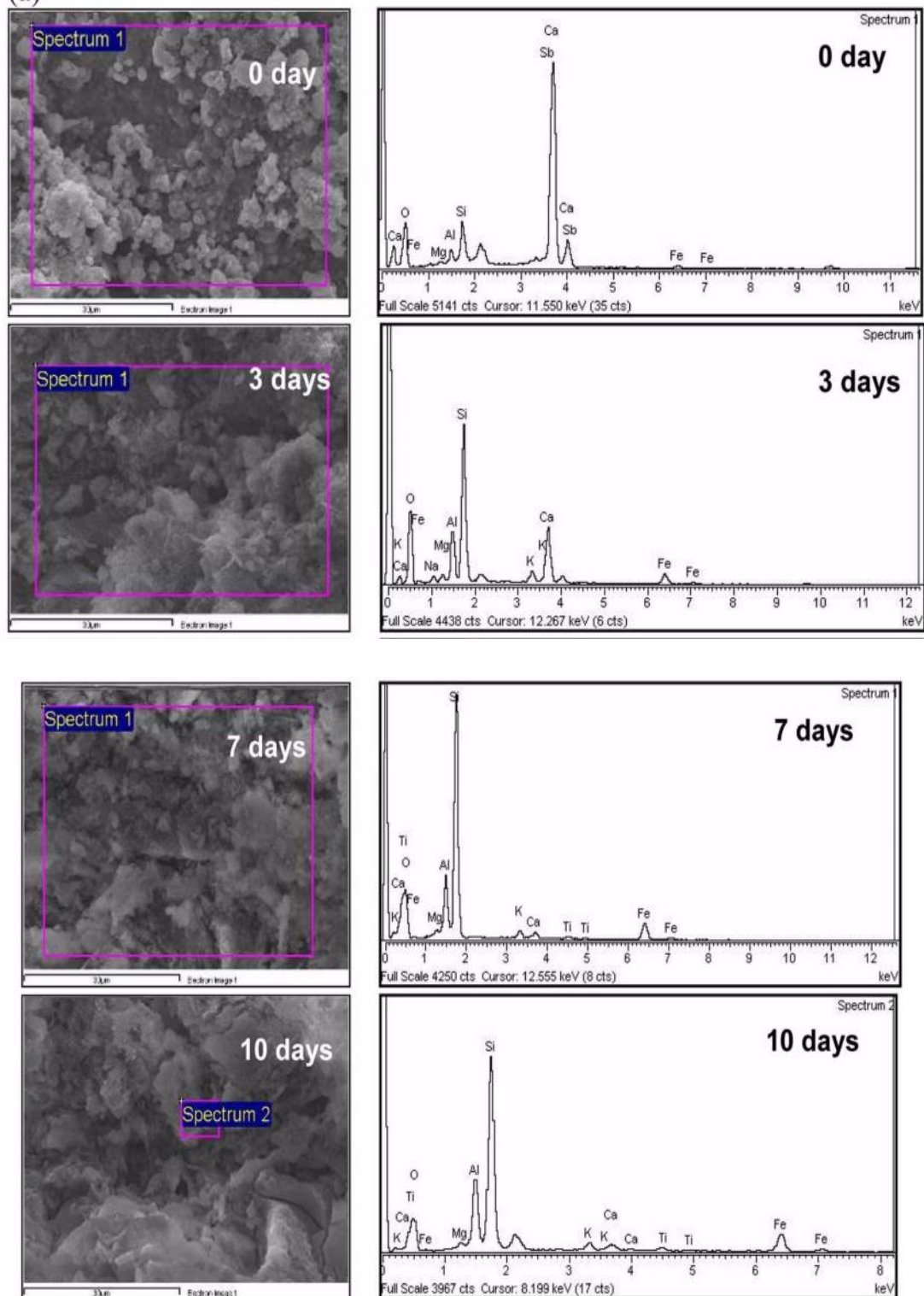


Figure I.10 : Relation entre la durée d'immersion et la résistance à la traction du béton détérioré **Y.F. Fan et al.**

Les tests SEM/EDS présenté dans la [figure I.11](#) montre une réduction significative de la teneur en élément Ca avec le temps d'immersion, tandis que la teneur en éléments Si et Al augmentent.

(a)



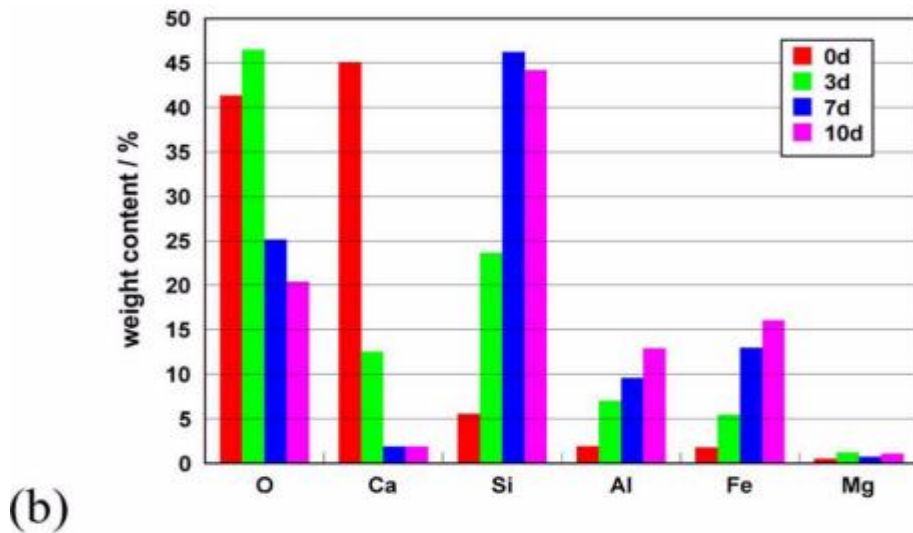


Figure I.11 : Spectre SEM/EDS d'un échantillon de béton sous différents états d'endommagement : (a) Spectres EDS d'un échantillon de béton sous différents états d'endommagement, (b) Évolution des teneurs pondérales en éléments chimiques **Y.F. Fan et al.**

R. Sri Ravindrarajah [22], s'intéresse dans une recherche a mené une étude sur la durabilité des bétons à hautes performances contenant de la fumée de silice FS face aux agressions de l'acide chlorhydrique, sulfurique et lactique. Le taux de substitution du ciment par la fumée de silice a été modifié à 0 %, 8 % et 15 %. La concentration des solutions acides a été maintenue 15%. Les résultats montrent que la résistance des BHP aux attaques par les acides dépend de type d'acide ; car la résistance chimique des BHP exposés à l'acide chlorhydrique a été renforcée grâce à l'ajout de fumée de silice, tandis que l'intégration de cette même fumée a eu un impact défavorable sur la résistance des BHP face à l'acide sulfurique, comme l'illustre la **figure. I.12**. L'attaque par l'acide lactique a été constaté le moins dangereux comparativement aux autres acides, aucune influence significative n'est observée avec l'ajout de fumée de silice concernant l'évolution de la résistance chimique des échantillons exposés à l'acide lactique. Le taux de réduction de la masse maximale a été constaté dans les échantillons attaqués par l'acide sulfurique sa valeur atteint le 20% après 30 jours d'immersion dans la solution agressive.

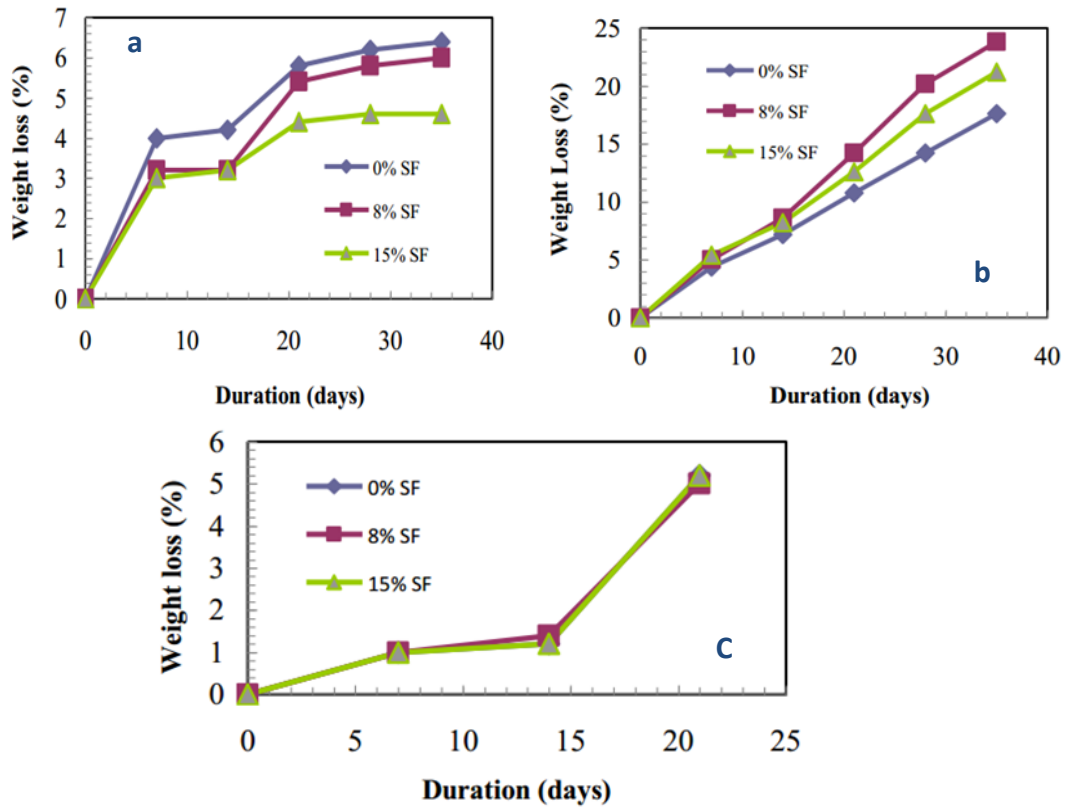


Figure I.12 : Perte relative de masse, a : acide chlorhydrique, b : acide sulfurique, C : acide lactique des BHP avec FS varie de 0%, 8% et 15 % **R. Sri Ravindrarajah[22]**.

Quoc Tri Phung et al [23], ont examiné la durabilité des pâtes de ciment face aux attaques du nitrate d'ammonium NH_4NO_3 . Les résultats montrent que NH_4NO_3 est un agent agressif pour la pâte de ciment, dont une accélération de lixiviation du **Ca** a été constatée durant l'attaque. En outre, la profondeur dégradée ainsi que le calcium **Ca** lessivé constituent une fonction linéaire croissante en fonction de la racine carrée du temps d'immersion des échantillons dans la solution de NH_4NO_3 . Tous les échantillons ont montré une élévation de la perméabilité à l'eau et de la porosité en fonction du temps.

Joanna Witkowska-Dobrev et al [66], ont étudiés l'influence des acides organiques hautement concentrés sur les éléments en béton des infrastructures d'élevage. Des échantillons de béton ordinaire, de dimensions $100 \times 100 \times 100$ mm, ont été immergés dans une solution d'acide acétique à 10 % pendant 270 jours. Les chercheurs ont ensuite mesuré la résistance à la compression et la perte de masse des échantillons, ainsi l'utilisation des images SEM et un profilographe 3D pour évaluer la rugosité de surface et sa profondeur dans la structure des échantillons exposés à l'acide. Les résultats obtenus ont été comparés à l'échantillon témoin (non soumis aux effets d'agents agressifs) ainsi qu'à ceux d'échantillons placés dans un environnement neutre et alcalin. La résistance à la compression des échantillons conservés

dans un milieu acide est inférieure de 22,23 % à celle de l'échantillon témoin, comme l'illustre la figure I.13.

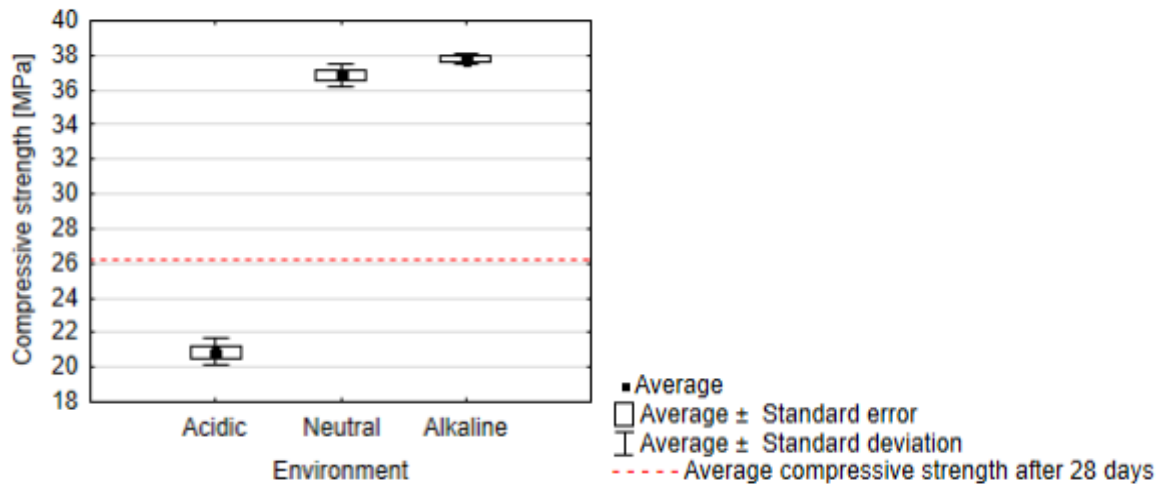


Figure I.13 : Valeurs de résistance à la compression dans différents environnements en relation avec la résistance moyenne à la compression après 28 jours **Joanna Witkowska-Dobrev et al [66].**

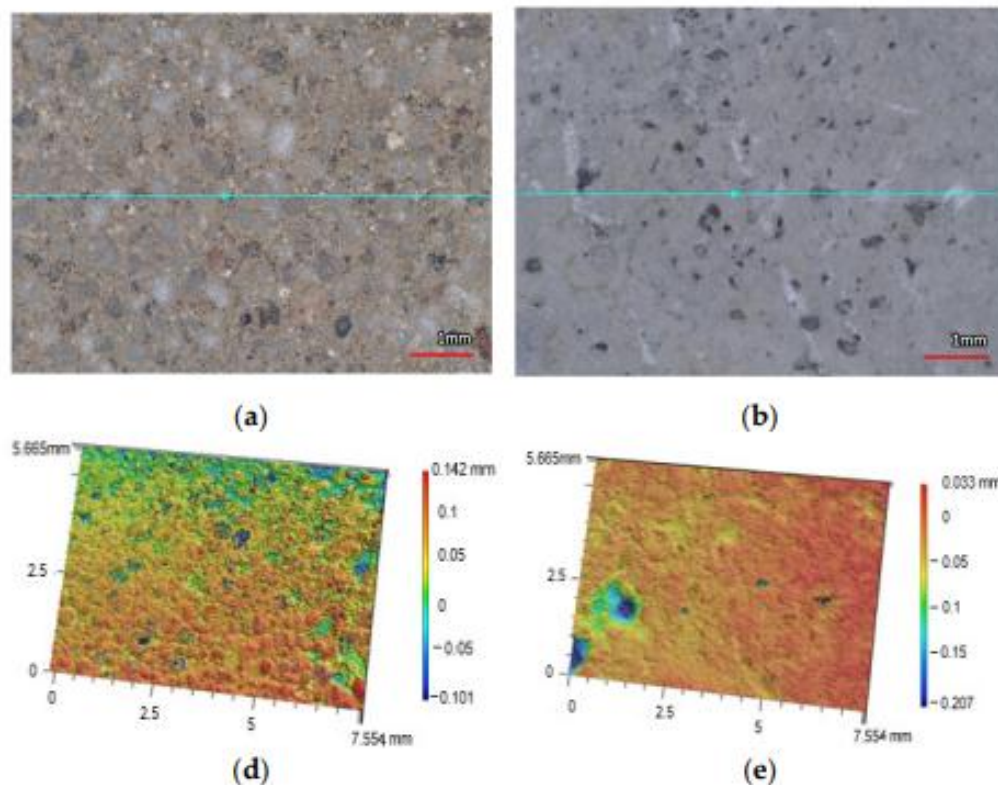


Figure I.14. Photographies d'échantillons avec lignes de profil tracées (lignes bleues) : (a) en milieu acide ; (b) en milieu neutre ; et structure géométrique des surfaces d'échantillons analysées en 3D (d) en milieu acide ; (e) en milieu neutre **Joanna Witkowska-Dobrev et al [66].**

Les résultats de mesure obtenus (Figure I.14 et Figure I.15), l'échantillon provenant d'un environnement acide est présente une différenciation topographique marquée : des pertes de masse sont visibles à la surface de l'échantillon dans l'image 3D (Figure 14 d-f).

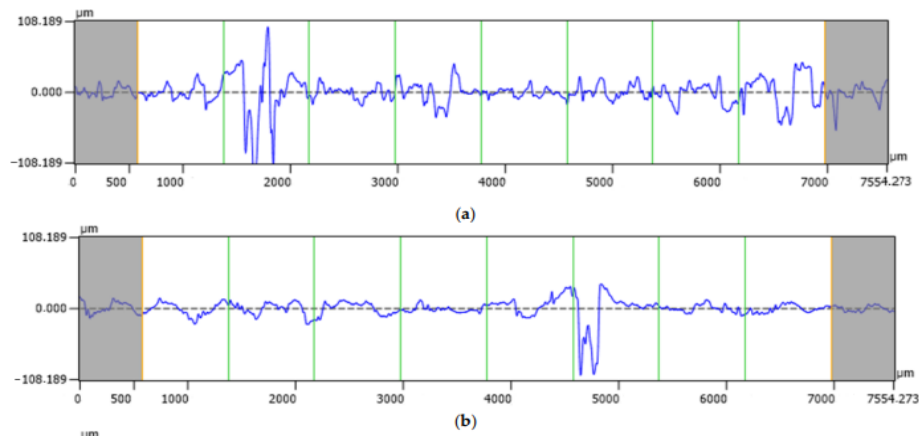


Figure I.15. Profils de rugosité le long des lignes de profil (en bleu) de la figure 10 a–b : (a) dans un milieu acide et (b) en environnement neutre **Joanna Witkowska-Dobrev et al [66]**.

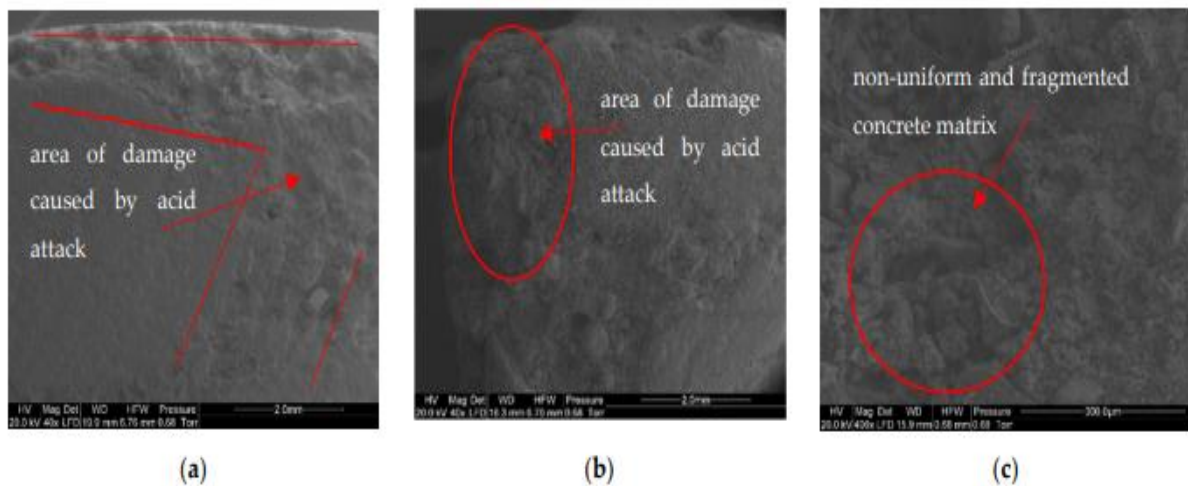


Figure I.16. Images SEM d'un échantillon immergée dans un environnement acide : (a) bord de l'échantillon (grossissement 40×) ; (b) coin de l'échantillon (grossissement 40×) ; (c) grossissement 400×. **Joanna Witkowska-Dobrev et al [66]**.

L'analyse microstructure montre une déformation de la surface de l'échantillon immergée dans un environnement acide, ainsi que des traces localisées et en creux de l'interaction acide. La figure I.16 a, b montrent des zones situées juste au bord de l'échantillon avec une couche clairement visible de structure de béton endommagée après contact avec l'acide acétique. Une matrice de béton non uniforme et fragmentée est également perceptible (figure I.16 c).

A.Jayaranjini et al [24], ont examiné l'impact de la substitution du ciment par de la fumé de silice et du métakaolin, ainsi que l'association de ces deux matériaux, tout en considérant également le remplacement des granulats fins par des cendres volantes le Bottom

ash (produit industriel) sur les propriétés physico-mécanique et la durabilité des BHP aux attaques chimiques. Pour évaluer la performance des BHP, cinq mélanges ont été testés. La composition de base a été réalisée en conformité avec la norme indienne IS 10262 – 1982. Les différents constituants des cinq compositions sont comme suit :

CC : C+S+G, **M3** : (C+10%MK)+S+G, **M7** : (C+10%MK)+(S+20%BA+G), **M10** : (C+10%MK+10% FS)+(S+G+20% BA), **M11** : (C+10%MK+10% FS+20%CV)+(S+G+20% BA).

C : ciment, **S** : sable, **G** : gravier, **Sp** : superplastifiant, **SF** : fumé de silice, **MK** : Métakaolin, **CV** : cendre de volante. **BA** : Bottom ash.

Après une période de 28 jours, les échantillons ont été pesés et ensuite immergés dans une solution contenant 5 % d'acide sulfurique H_2SO_4 pendant 28 jours. La meilleure résistance aux attaques d'acide sulfurique a été constaté à la combinaison de BHP M10 (10% SF + 10% MK + 20% BA), une diminution relative de la masse s'élevait à 0,66 %, tandis que le taux de réduction de la résistance à la compression était de 2,62 %, ce qui est considérablement inférieur à celui de la composition de base en béton, comme l'illustrent les figures I.17-a et I.17-b.

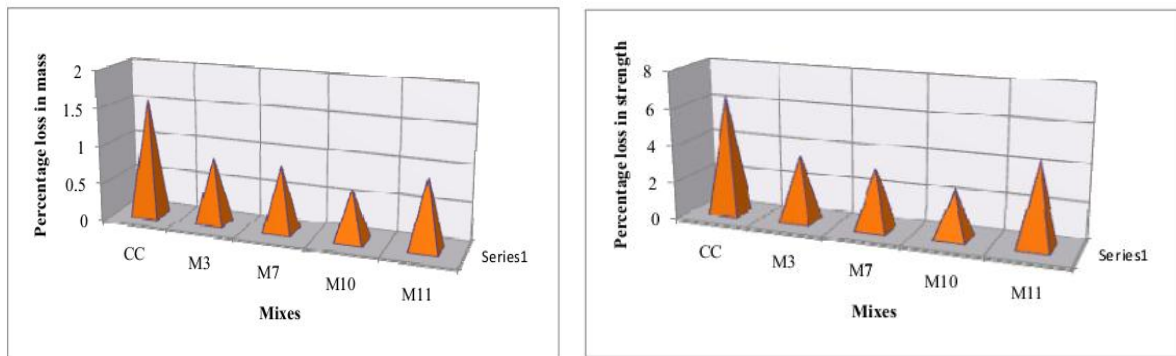


Figure I.17-a : Perte relative en masse [24] **Figure I.17-b :** Taux de réduction de la résistance à la compression [24]

Salim Barbhuiya et al [25], ont examiné le comportement du béton face aux attaques d'acide sulfurique à 3 % et d'acide nitrique à 1,5 %. Dans cette étude, le ciment a été remplacé par un mélange de cendres volantes et de cendres volantes ultra fines. Les résultats ont montré que la perte de résistance à la compression du béton dans ces milieux acides était minimale lorsque le ciment était substitué par 30 % de cendres volantes et 10 % de cendres volantes ultra fines. Ce mélange a également démontré la perte de masse la plus réduite lors de son exposition à ces acides. L'image MEB d'un mélange de béton contenant 30 % de cendres volantes et 10 % de cendres volantes ultra fines, après avoir été attaqué par l'acide sulfurique pendant 28 jours, l'image de la figure I.18 montre que la surface est très poreuse. Une quantité notable de C-S-H a été décomposée en particules plus fines. Le même mélange a été exposé à l'acide nitrique pendant une durée de 90 jours. L'image MEB présentée dans la figure

I.19 illustre une surface très poreuse, avec de sel à la surface qui résulte par la réaction de l'acide avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

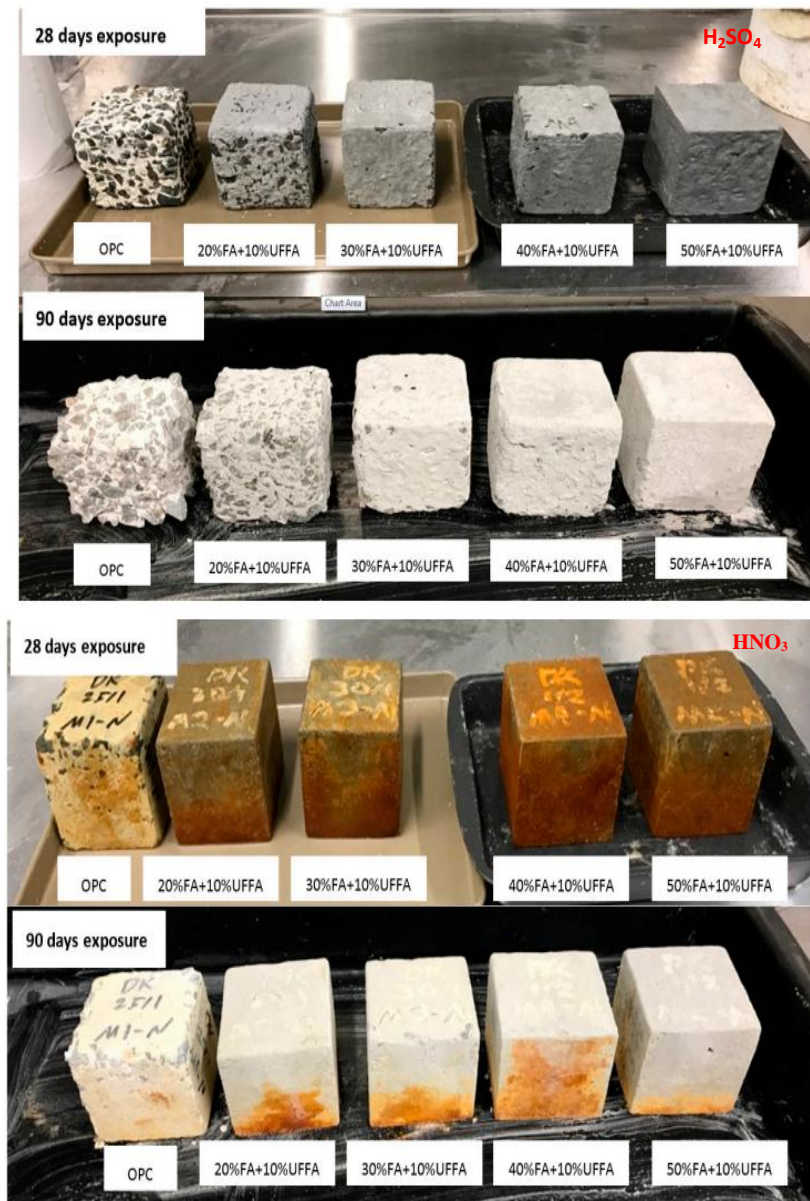


Figure I.18: Aspect des échantillons après l'attaque par les acides **Salim Barbhuiya et al.**

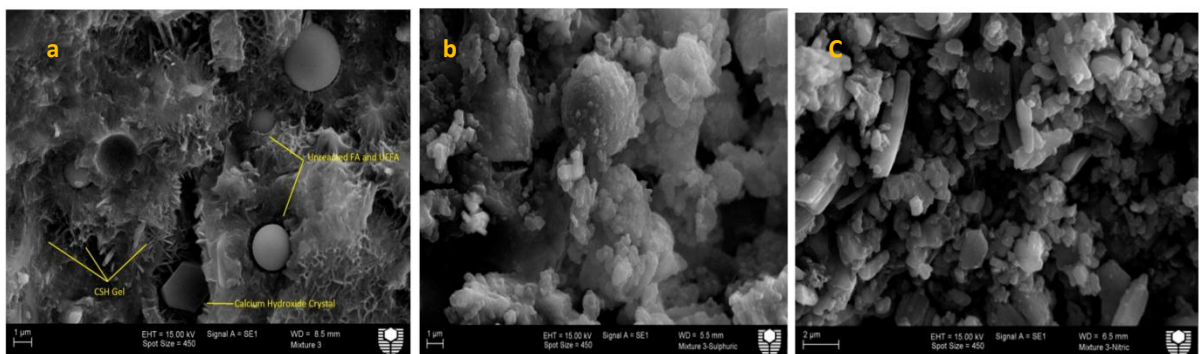


Figure I.19: Image MEB d'un béton composé de 30 % de cendres volantes et de 10 % de cendres volantes ultra fines, soumis à une période d'exposition de 28 jours à (a: eau, b: 3% H_2SO_4 , C:1.5% acide nitrique HNO_3) **Salim Barbhuiya et al [25]**.

R. Deepiya et al [26], s'intéressent dans une étude de recherche sur la performance mécanique et la durabilité des BHP avec metakaolin aux attaques des deux type d'acides forts ; sulfurique H_2SO_4 et chlorhydrique HCL . Le pourcentage de ciment substitué par le métakaolin a été varié entre 0 % et 50 %, avec des incréments de 10 %. L'étude montre que la performance mécanique optimale ainsi la meilleure durabilité aux attaques des acides sont maximisées avec un taux de remplacement de ciment par du métakaolin de 30 %. À 28 jours de durcissement, la résistance à la compression a enregistré une amélioration de 11,38 % par rapport à la composition initiale (sans substitution). L'attaque de l'acide sulfurique provoque une grande formation de gypse dans les zones adjacentes aux surfaces, ce qui provoque un écaillage fragile de la surface. L'ajout de 30 % de métakaolin diminue la réaction avec H_2SO_4 par rapport à la composition de référence.

M.R. Ahmad et al. [67] ont étudié l'effet de différents ajouts sur la résistance au H_2SO_4 (5 %) des mortiers activés par les alcalins AAM, Le silicate de sodium (Na_2SiO_3) a été utilisé comme activateur alcalin dans cette étude. Il s'agissait d'une poudre anhydre avec un module de 0,92, $\text{Na}_2\text{O} = 50,2$ % et $\text{SiO}_3 = 46$ %. L'impact de la fumée de silice FS, de l'oxyde de magnésium MgO , du clinker de ciment et du métakaolin MK ont été ajoutés aux mortiers avec les proportions suivantes : 1,5, 3 et 4,5 %. La résistance aux acides a été évaluée après 270 jours d'immersion dans du H_2SO_4 (5 %). Comme le montre la **figure I.20**, L'incorporation de SF, MgO , CK et MK renforce les caractéristiques de durabilité des mortiers activés par les alcalins AAM.

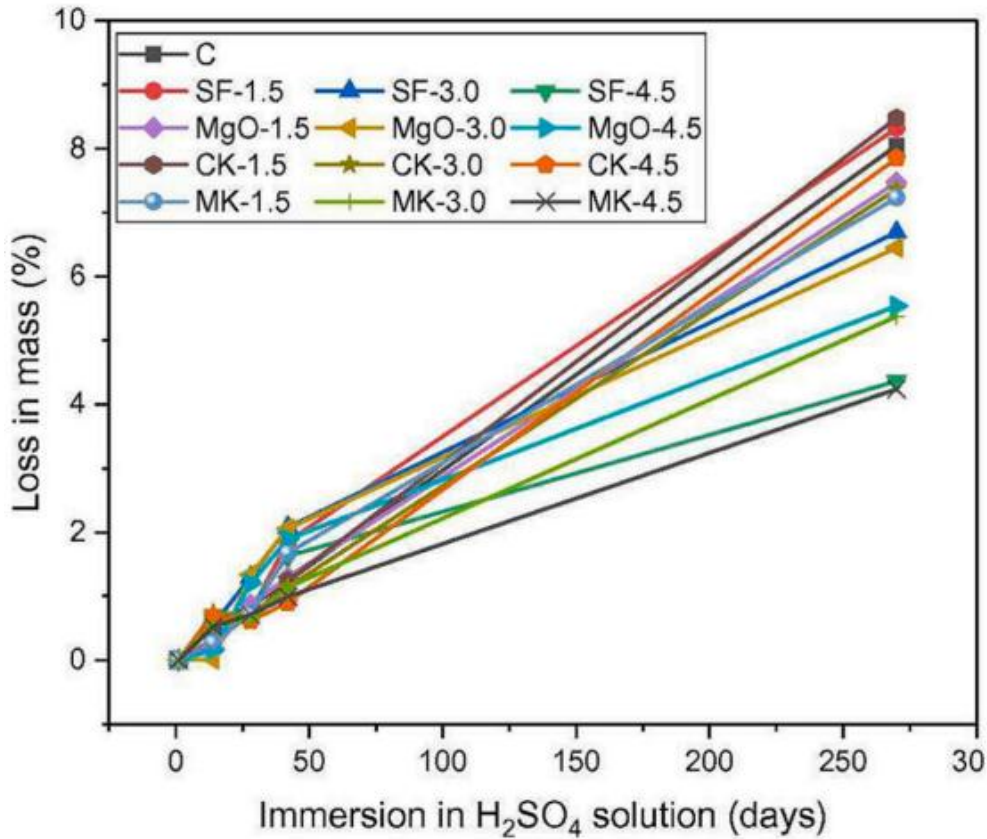


Figure. I.20. Impact des ajouts sur des mortiers activés par un alcali et exposés au H_2SO_4
M.R. Ahmad et al. [67].

V. Pavlik [27], a étudié l'effet des différents types d'acides forts et faibles, ainsi un mélange d'acide sur la pâte de ciment CEM I 42.5 et avec une concentration d'acides qui varie. Les acides examinés sont : l'acide chlorhydrique, l'acide acétique, l'acide formique, l'acide sulfurique et l'acide benzoïque. Pour mesurer la profondeur altérée de la pâte de ciment, **V. Pavlik** a utilisé un tube en verre rempli de cette pâte. Les mesures de résistance mécanique ont été effectuées à l'aide d'éprouvettes cubiques et cylindriques.

Selon les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, **V. Pavlik** identifie une relation entre la profondeur d'altération, de la concentration d'acide chlorhydrique et la durée pendant laquelle les échantillons sont immergés dans la solution corrosive, ceci avec l'application de la méthode des moindres carrés l'équation déduite s'écrit sous la forme : $d = 2.19 \cdot C^{0.69} \cdot t^{0.63}$ avec d : profondeur d'altération, C : concentration d'acide chlorhydrique et t : le temps consacré à l'immersion.

De plus, les échantillons de pâte en ciment ont montré les taux d'altération les plus élevés lorsqu'ils ont été exposés à des solutions d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique. Ainsi, la profondeur d'altération causée par l'acide sulfurique a évolué plus lentement par rapport aux

acides acétique et formique, comme l'illustre la [figure I.22](#), ceci a été expliqué par la solubilité relativement faible de sulfate de calcium formé qui accumule à la surface. Le taux d'altération maximale est observés dans les échantillons attaqués par l'acide chlorhydrique [figure I.21](#) et [I.22](#) ; la vitesse d'altération des mélanges d'acides sulfurique et chlorhydrique a été remarqué intermédiaire (valeur de la résistance mécanique, profondeur d'altération et perte relative de masse) voir les [figures I.22](#) et [I.23](#).

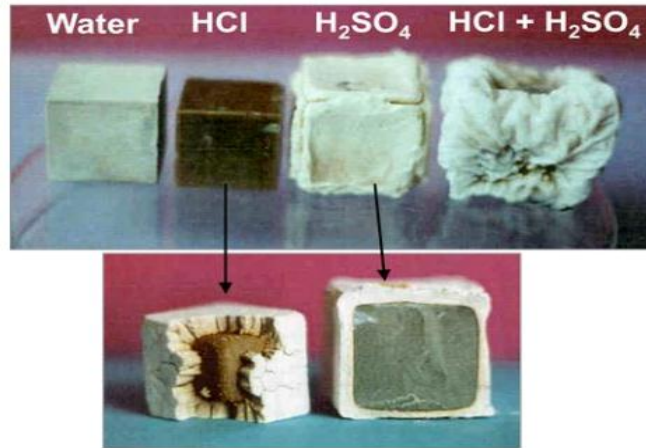


Figure I.21. Présentation visuelle des échantillons de pâte de ciment durci, avec un rapport e/c de 0,4, après avoir durci pendant 25 jours dans l'eau. (en haut à gauche) et après leur exposition dans une solution agressive d'acide [V. Pavlik \[27\]](#).

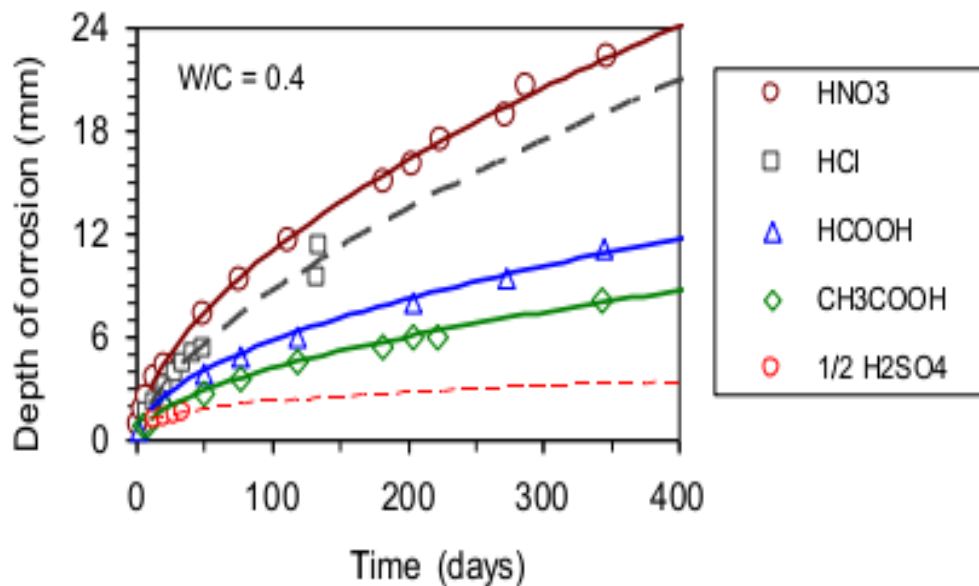


Figure I.22. Augmentation de la profondeur de corrosion dans la pâte de ciment (e/c = 0,4) dans les tubes en verre dans les solutions agressive de différents acides à concentration constante ($c = 0,1 \text{ mol.dm}^{-3}$ [V. Pavlik \[27\]](#)).

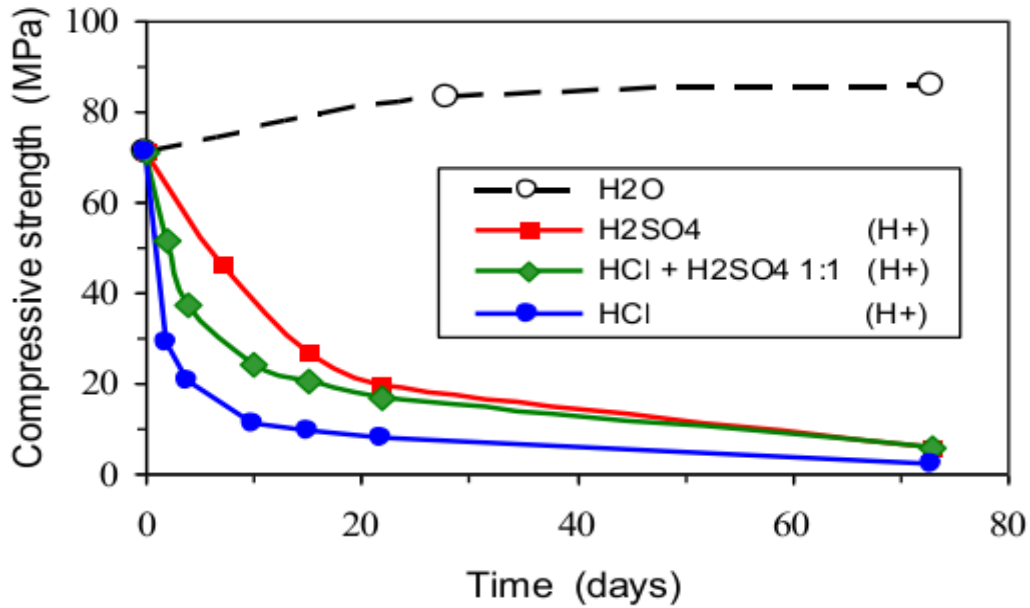


Figure I.23. Résistance à la compression des spécimens de la pâte de ciment exposé à l'agression d'acide chlorhydrique, d'acide sulfurique et d'un mélange des deux. La teneur en ions H^+ dans chaque solution était égale ($[H^+] = 0,25 \text{ mol/l}$) **V. Pavlik [27]**.

En ce qui concerne l'attaque par H_2SO_4 , la couche de corrosion était moins poreuse et était composée d'un mélange de gypse peu soluble ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et de gel SiO_2 . figure I.21 et I.24. Dans le contexte d'une attaque acide due à une solution de HCl et de H_2SO_4 , le sulfate de calcium a précipité non seulement à l'intérieur de la couche de corrosion, mais également juste à côté de l'échantillon, se manifestant sous la forme d'une boule poreuse aux contours irréguliers. (figure. I.21).

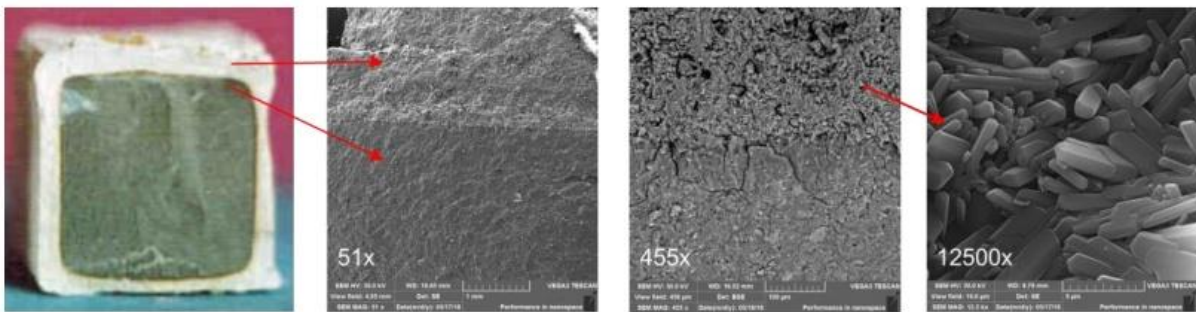


Figure I.24. Coupe d'un échantillon attaqué par la solution d'acide sulfurique avec images SEM des secteurs voisins de la zone de réaction et des cristaux de gypse au sein de la couche affectée **V. Pavlik [27]**.

M.T. Bassuoni et al [28], ont étudié la durabilité des **BAP** aux attaques de l'acide sulfurique à un $\text{pH}=1.5$ et 1, dans un ordre successif. Les variables principales incluent le rapport entre le sable et les granulats, ainsi que les différents mélanges de substituts de ciment (liants simples, binaires, ternaires et quaternaires). Dans cette étude, les substituts retenus sont : la fumée de silice, les cendres volantes, les fillers calcaires et les scories. L'utilisation de méthodes binaires, ternaires et quaternaires a permis d'améliorer la résistance du **BAP** aux agressions acides. L'augmentation de la fraction volumique des gros agrégats a été efficace pour limiter la perte de masse en réduisant la surface de ciment réactive avec l'acide. De plus, il n'y a pas de relation directe entre la perte de résistance à la compression et la perte de masse des échantillons de **BAP** exposés à l'acide sulfurique.

Khan et al. [29] ont examiné la substitution des cendres volantes par des déchets de verre, pouvant atteindre 40 %, dans des cendres volantes et des scories activées par des alcalins. Ils ont soumis les mortiers à des solutions de H_2SO_4 (3%) et de HCl (3%) pendant une période d'un an, et ont observé que l'ajout de déchets de verre augmentait la résistance aux acides, tant en ce qui concerne la perte de masse que la résistance mesurée. De plus, il a été noté qu'un taux de remplacement de 10 à 20% était optimal.

I.4 Résistance des bétons face aux agressions des sulfates:

L'impact des sulfates sur le béton fait l'objet de recherches à l'échelle mondiale depuis de nombreuses années. Les sources externes de sulfates comprennent les sulfates naturels présents dans l'environnement, tels que les sols, les eaux souterraines, l'eau de mer et les eaux usées, ainsi que ceux générés par des processus industriels ou diverses activités humaines. Par exemple, les engrais peuvent souvent libérer des sulfates dans le sol et les eaux souterraines, comme l'indiquent **Ginette Arliguie et al. [30]** et **ADAM NIVILLE [10]**. Parmi les sulfates fréquemment rencontrés dans les sols et les eaux souterraines, on trouve les sulfates de sodium, de potassium, de calcium et de magnésium, selon **ADAM NIVILLE [10]**. Les sources internes de sulfates peuvent également inclure ceux qui sont ajoutés aux ciments utilisés pour la fabrication du béton. Des tests standards ont été mis en place pour mesurer la résistance du béton à l'attaque des sulfates **Ginette Arliguie et al [30]**. Les essais incluent ceux qui suivent les variations de la résistance des éprouvettes de béton après des périodes d'immersion spécifiques dans des solutions de sulfate de composition connue, ainsi que ceux qui emploient la diffraction des rayons X pour analyser des échantillons de béton à la

recherche de produits expansifs (par exemple Ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) et thaumasite (formule) qui ont été résultent d'une attaque du sulfate **Ginette Arliguie et al [30]**, **Aimin Xu et al [31]**. L'une des premières approches pour accroître la résistance du béton aux agressions des sulfates a été fondée sur l'observation que les aluminates de calcium présents dans le ciment réagissent avec les sulfates, entraînant une expansion du béton. Certains pays ont alors commencé à réglementer la composition des ciments utilisés pour fabriquer le béton. En outre, **R.P. Khatri et al [61]**, la performance relative de béton aux attaques des sulfates ne peut pas être estimée uniquement par leur perméabilité ou uniquement par sa résistance chimique du liant. La perméabilité et le type de liant jouent tous deux un rôle significatif dans l'agression des sulfates.

I.4.1 Processus d'attaque des sulfates :

L'attaque par les sulfates se caractérise par la dégradation du béton due à des interactions physico-chimiques entre les minéraux présents dans la pâte de ciment Portland hydraté et les sulfates présents dans l'environnement (**Mehta et al, 1992**). Ces interactions entraînent une expansion et des fissures dans le béton.

L'attaque interne des sulfates est principalement attribuée à la formation d'ettringite dans la pâte de ciment durcie, résultant d'une concentration excessive de sulfate dans le matériau cimentaire, ainsi que par une exposition précoce à des températures supérieures à 60°C (par exemple lorsque le béton est durci à la vapeur).

Trois types d'ettringites peuvent exister dans le même matériau résultent par l'attaque des sulfates internes et externe **Ginette Arliguie et al [30]**:

Ettringite de formation primaire : N'entraîne pas d'expansion, ce produit résulte de l'hydratation du ciment, formé par la réaction d'un régulateur de prise tel que le gypse avec l'aluminate tricalcique C_3A présent dans le clinker.

Ettringite de formation secondaire : pouvant de causer ou non une expansion :

Ettringite de formation secondaire provoque d'expansion : Ce type d'ettringite, qui entraîne une expansion, est le résultat de l'action des sulfates issus de l'environnement extérieur ou, plus rarement, d'un excès de sulfates internes dans les granulats, d'un gypse excessif dans le ciment ou de l'eau de gâchage.

Ettringite de formation secondaire ne provoque pas d'expansion : Dans un béton soumis à des conditions humides, l'ettringite se développe par la dissolution et la recristallisation d'une ettringite préexistante, connue sous le nom d'ettringite de formation primaire ou différée, et se cristallise dans les pores.

Ettringite de formation différée : consécutive à un échauffement du béton au cours de son histoire, ce type d'ettringite peut entraîner ou non une expansion.

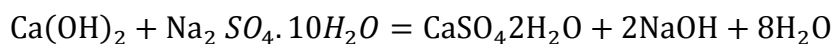
Les principales sources de sulfates externes sont l'eau de mer et les eaux souterraines, ainsi que les eaux usées contiennent des sulfates et affectent également les structures en béton [30], [31].

I.4.2 Action des sulfates

Aimin Xu et al [31], Les réactions chimiques entre les sulfates et les composants de la pâte de ciment sont identifiées comme la cause principale de la dégradation du béton. En général, le sel de sulfate se dissout dans l'eau, provoquant une attaque sur les hydrates de ciment tels que le Ca(OH)_2 , le silicate de calcium hydraté (CSH) et les hydrates d'aluminate de calcium. Le processus de réaction dépend du type de sel de sulfate et des produits générés, ainsi que de la solubilité de chaque élément, qui varie en fonction du pH de la solution.

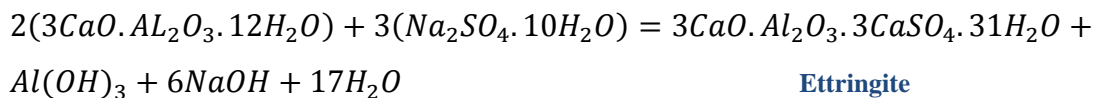
- Sulfate de sodium Na_2SO_4

La portlandite Ca(OH)_2 réagit avec le sulfate de sodium, ce qui donne naissance au gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$:



Portlandite

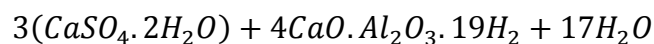
gypse



Ettringite

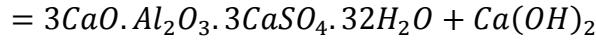
- Sulfate de calcium CaSO_4

Le sulfate de calcium, que l'on trouve dans le sol ou qui provient de la réaction entre Ca(OH)_2 et le sulfate de sodium (gypse secondaire), peut interagir avec l'aluminate de calcium hydraté, identique à celui présent dans la pâte de ciment fraîche ou dans le béton, entraînant ainsi la formation d'ettringite:



Gypse secondaire

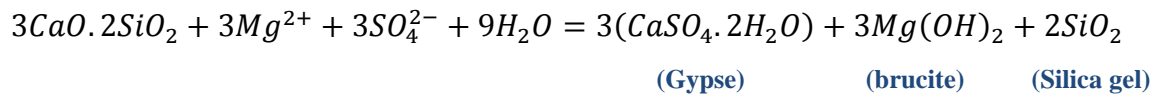
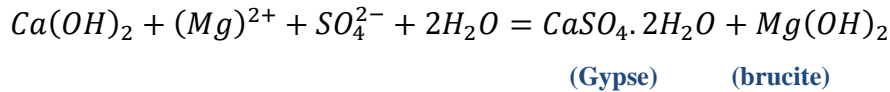
Aluminate de calcium hydraté



Ettringite

- Sulfate de magnésium $MgSO_4$

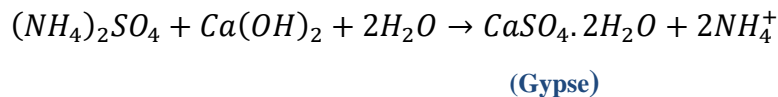
Le sulfate de magnésium réagit avec $Ca(OH)_2$ et CSH pour produire du gypse secondaire ($CaSO_4.2H_2O$) et du gel de silice (SiO_2) :



Regourd (1981) a montré que le gypse peut avoir la forme d'un prisme plat poussant à proximité du $Ca(OH)_2$.

- Sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$

Le sulfate d'ammonium en solution réagit avec le $Ca(OH)_2$ dans le béton pour produire du gypse ($CaSO_4.2H_2O$) et libérer de l'ammonium en solution :



I.4.3 Revues bibliographies

E.E. Hekal et al [32], ont étudié les mécanismes d'altérations des certaines matrices cimentaires durcis avec et sans ajout cimentaires aux attaques de 10% du sulfate de magnésium $MgSO_4$ et dans différentes conditions climatiques : température ambiante, température de 60 °C et cycles de séchage-immersion à 60 °C et ce avec un rapport E/C=0.3. Ce processus peut être perçu comme une approche rapide pour évaluer la résistance aux sulfates des pâtes de ciment durcies, des mortiers et des bétons. Les matériaux ajoutés dans les divers mélanges comprennent de la fumée de silice, des scories et du calcaire. Les principales conclusions de cette étude sont résumées ci-après:

1 L'utilisation de 10 à 15 % de fumée de silice en substitution partielle du ciment Portland n'a pas démontré d'amélioration significative de la résistance au sulfate des pâtes de ciment durcies.

2. Il a été observé que les pâtes de ciment durcies, qui contiennent 40 % de laitier ou 5 % de fines calcaires, présentent une résistance aux sulfates nettement plus élevée que celle des pâtes sans ajout.

3. Exposition à une solution de sulfate à une température de 60°C, accompagnée de cycles de mouillage et de séchage (immersion dans la solution) peuvent être considérés comme méthode d'attaque au sulfate [figure I.25](#).

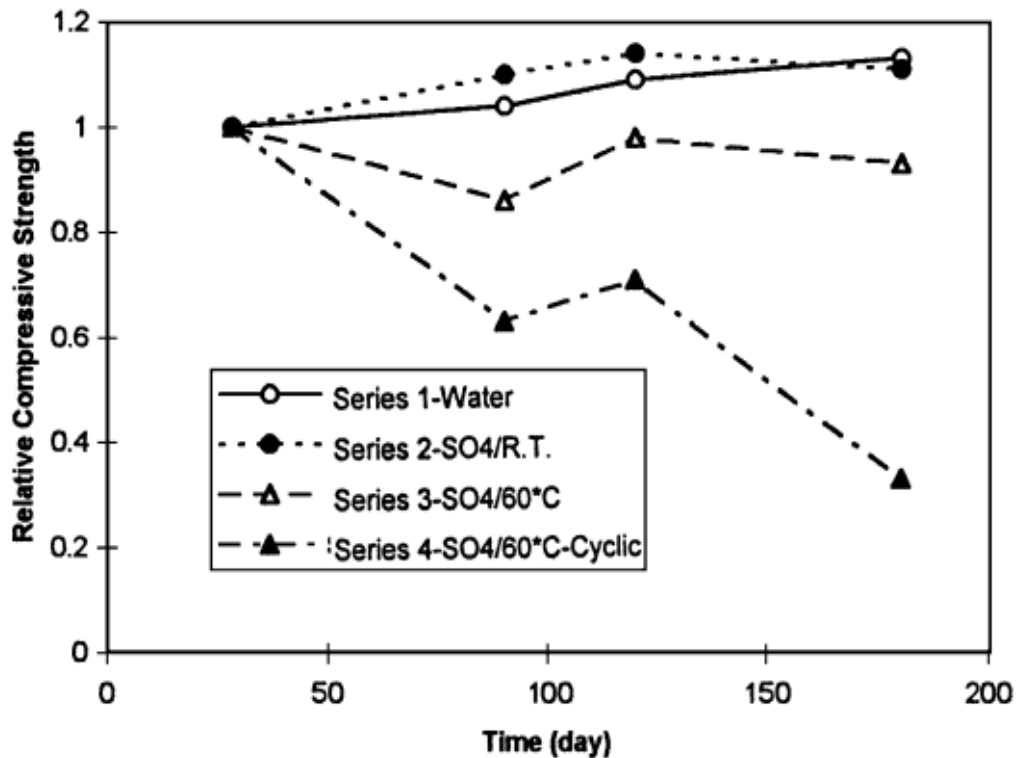


Figure I.25 : Résistance relative à la compression en fonction du temps pour les pâtes OPC (Mix I) immergés dans des solutions de MgSO_4 E.E. Hekal et al [32].

J. Zeli et al [33] présentent dans leur étude l'impact des ajouts de calcaire et de fumée de silice sur la durabilité des mortiers face aux attaques des sulfates de **sodium** Na_2SO_4 et de **magnésium** MgSO_4 . Les résultats indiquent qu'une résistance accrue aux sulfates et une expansion réduite sont observées dans les mortiers contenant plus de 5 % de fumée de silice et plus de 2 % de calcaire. De plus, les analyses par rayons X, illustrées dans la figure I.26, révèlent une diminution des pics de CH (portlandite) avec l'augmentation de la proportion de fumée de silice dans les échantillons de mortier. Les composés gypse et ettringite ont été identifiés dans toutes les formulations.

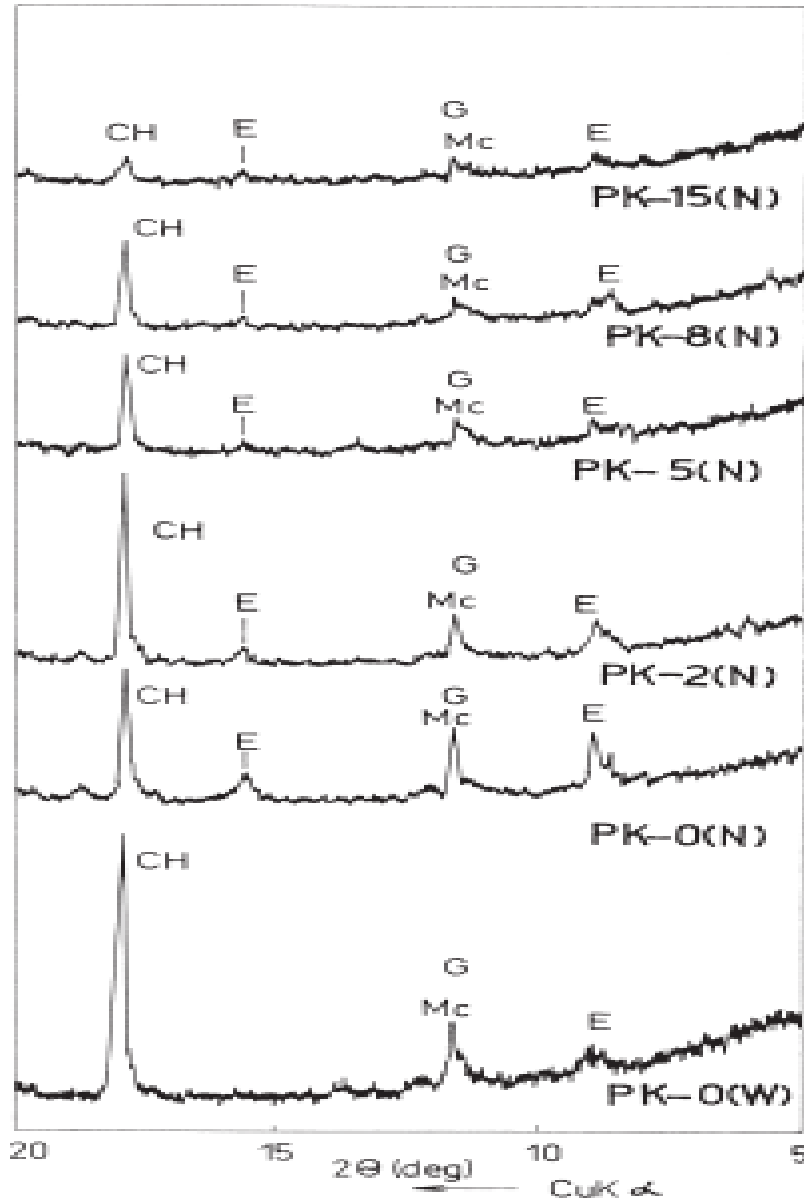


Figure I.26 : Diagrammes de diffraction des rayons X des mortiers de la série PK après 120 jours d'exposition à la solution de Na_2SO_4 . Le mortier témoin PK-0 a été immergé dans eau
J. Zeli et al [33].

Gaowen Zhao et al [34], ont étudiés le processus de dégradation du béton coulé sur place et le béton préfabriqué, Ils ont été immergés dans des milieux corrosifs contenant des sulfates de sodium Na_2SO_4 . Des échantillons de béton, soumis à diverses conditions de durcissement, ont été préparés et plongés dans des solutions de sulfate pendant une période de 12 mois afin de simuler la corrosion des structures en béton préfabriqué et coulé sur place, respectivement (pour le béton préfabriqué, les échantillons ont été durcis pendant 28 jours avant d'être mis en solution, en ce qui concerne le béton coulé sur place, les échantillons ont été placés en solution après avoir durci pendant 12 heures. Les images SEM, d'analyse EDS et DRX, l'ettringite et du gypse ont été observés dans les échantillons de béton préfabriqué et

coulé sur place voir les figures I.27 et I.28. Ainsi, les résultats indiquent que la dégradation du béton coulé sur place est beaucoup plus rapide que la dégradation du béton préfabriqué dont la concentration des sulfates dans les bétons coulés sur place est observé plus élevée que celle des spécimens de béton préfabriqué figure I.29.

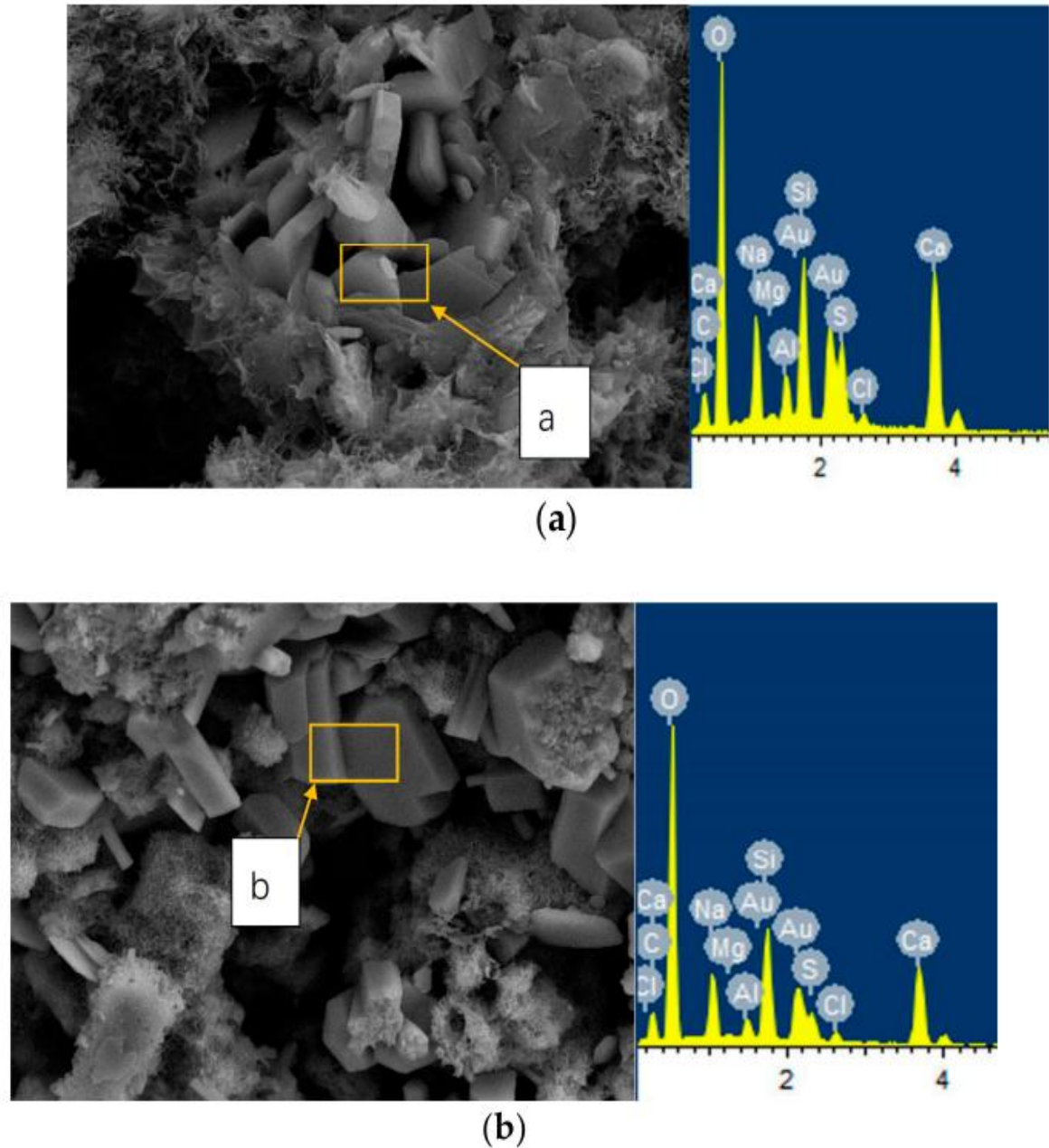


Figure I.27. Images MEB et résultats EDS relatifs au béton exposé à des solutions de sulfate à 10 % pour (a) béton préfabriqué, grossissement = 5 K, et (b) béton coulé sur place, grossissement = 2,5 K **Gaowen Zhao et al [34].**

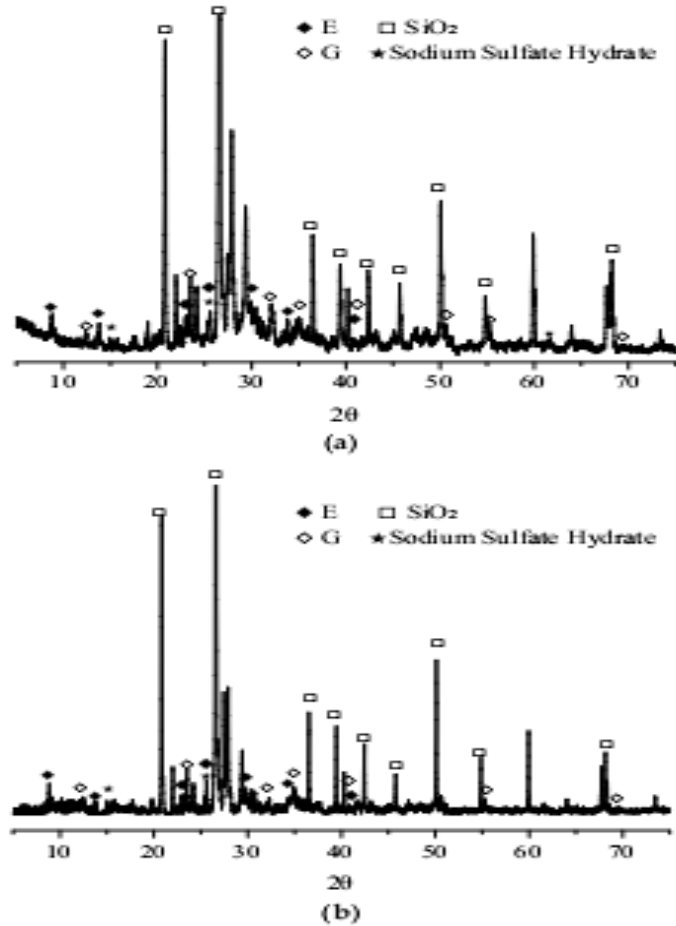


Figure I.28. Analyse par DRX de béton exposé à des solutions de sulfate à 10 % pour (a) béton préfabriqué, et (b) béton coulé sur place [Gaowen Zhao et al \[34\]](#).

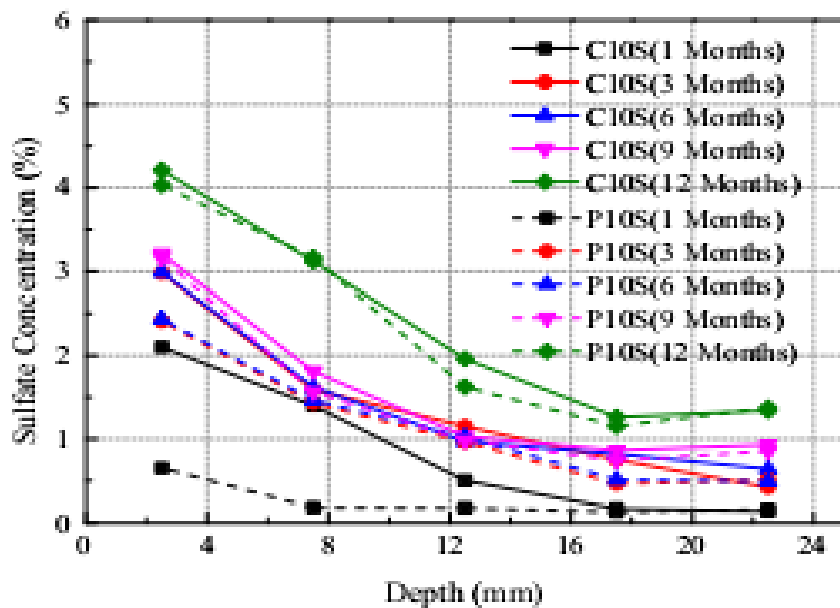
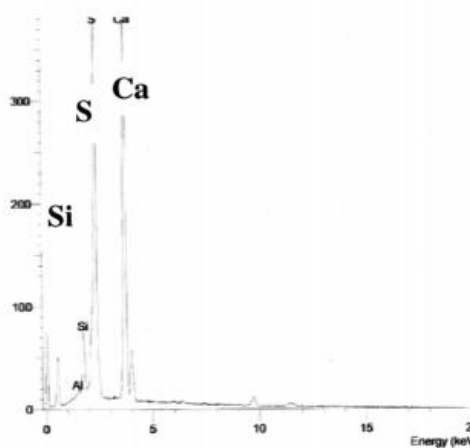
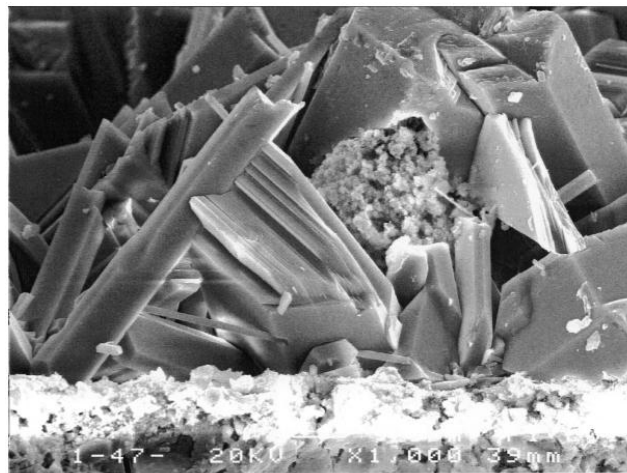
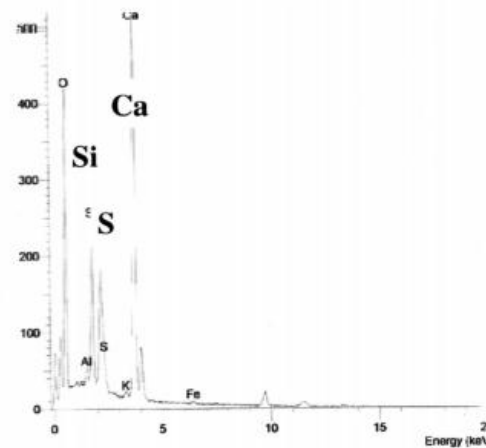


Figure I.29. Concentration en sulfate dans les bétons rapports eau/ciment : 0,55, solution 10 % de sulfates de sodium Na_2SO_4 [Gaowen Zhao et al \[34\]](#).

Frank Rendell et al [35], ont étudiées la durabilité des mortiers aux attaques du sulfate d'ammonium durant 28 jours. Les résultats montrent qu'à la surface d'échantillons exposés au sulfate d'ammonium une couche superficielle constituée par des fibres transparentes en forme d'aiguille a été remarqué **figure I.30**. Ces cristaux présentent une longueur de quelques millimètres et une section d'une dizaine de microns. À l'intérieur des échantillons, à environ 100 µm de la surface, la quantité de soufre était considérablement réduite. Cependant, le matériau de cette zone a subi des détériorations, ce qui a entraîné une augmentation de la porosité.



Micro-probe analysis (surface)



Micro-probe analysis 100µm from the surface

Figure I.30 : image MEB sur la surface attaquée par le sulfate d'ammonium **Frank Rendell et al.**

Ibrahim Messaoudene et al [36], examinent la durabilité du béton utilisé dans les barrages, exposé à de l'eau traitée avec du sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, un flocculant employé dans le traitement de l'eau potable, pendant une période de deux mois. Deux types de ciments algériens ont été examinés : le ciment CPA CEMI 42.5 et le ciment CPJ-CEMII/B

42.5. D'après les résultats d'Ibrahim Messaoudene et al. [36], une augmentation de la résistance d'environ 30 % a été constatée pour le béton à base de ciment CPA avec une faible concentration de sulfate d'aluminium (25 mg/l), ainsi qu'une résistance similaire pour une concentration cent fois plus élevée (2500 mg/l). En revanche, pour le béton à base de ciment CPJ, une augmentation de 10 % des résistances a été notée à faible concentration (25 mg/l), tandis que les résistances sont restées constantes à la concentration plus élevée (2500 mg/l), comme illustré dans la figure I.31. L'analyse DRX de la pâte de ciment conservée dans une solution de sulfate d'aluminium à forte concentration (Figure I.32) révèle une diminution significative de l'intensité des pics associés à la portlandite, tandis que la phase de gypse a augmenté, accompagnée de la présence d'ettringite.

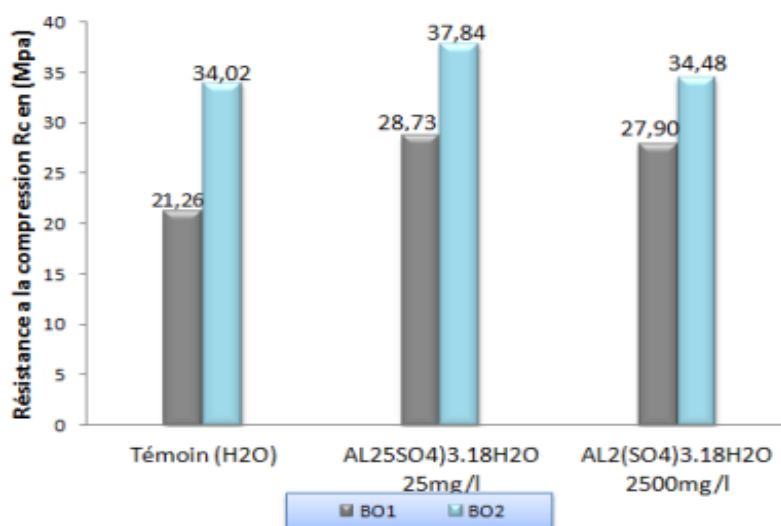


Figure I.31 : Evolution de la résistance à la compression Ibrahim Messaoudene et al [36].

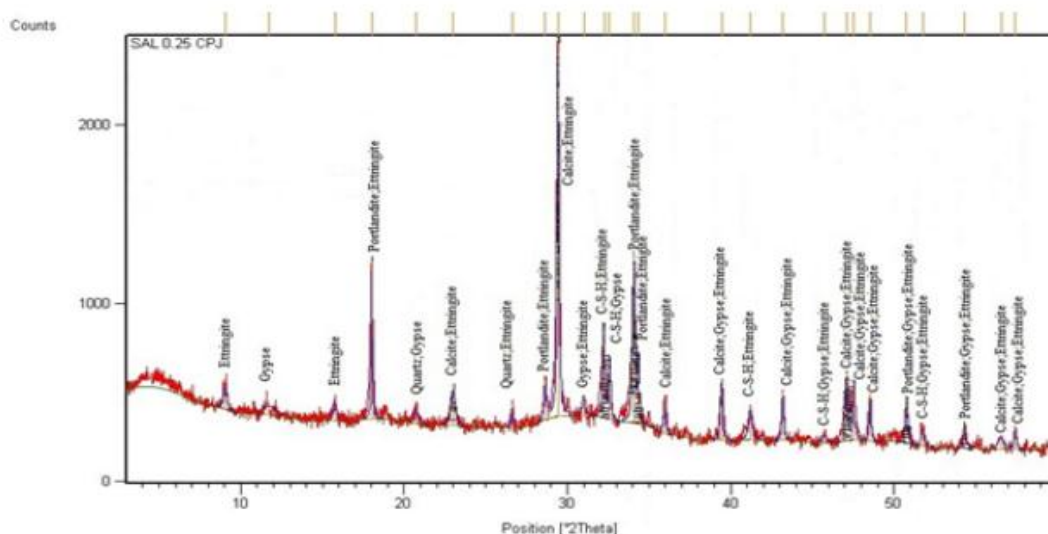


Figure I.32 : Diagramme DRX de la pâte de ciment à base de CPJ plongée dans $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ Ibrahim Messaoudene et al [36]

Selon les résultats obtenues par **Stephen O. EKOLU et al [37]** la résistance (expansion des éprouvettes) aux sulfates a été améliorée avec l'incorporation de laitier de haut fourneau granulé broyé.

La résistance du béton à haute performance face aux attaques sulfatiques, en présence de cendres volantes, de fumée de silice, de laitier de haut fourneau et de métakaolin, a été analysée par **M Vijaya Sekhar Reddy et al [38]**. Ils ont mesuré la perte de résistance à la compression des cubes de béton immergés dans une solution d'eau sulfatée contenant 5 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et 5 % de sulfate de magnésium (MgSO_4). Ce type d'essai accéléré est essentiel pour évaluer la résistance du béton aux sulfates. Les résultats ont montré que la perte maximale de résistance à la compression était de 14,9 % pour la composition BHP M90, avec un remplacement de 33 % de cendres volantes et 15,13 % de laitier de haut fourneau. En revanche, la perte minimale a été observée avec un taux de remplacement de 13,2 % de cendres volantes et 15,13 % de métakaolin, comme illustré dans les figures I.33 et 34.

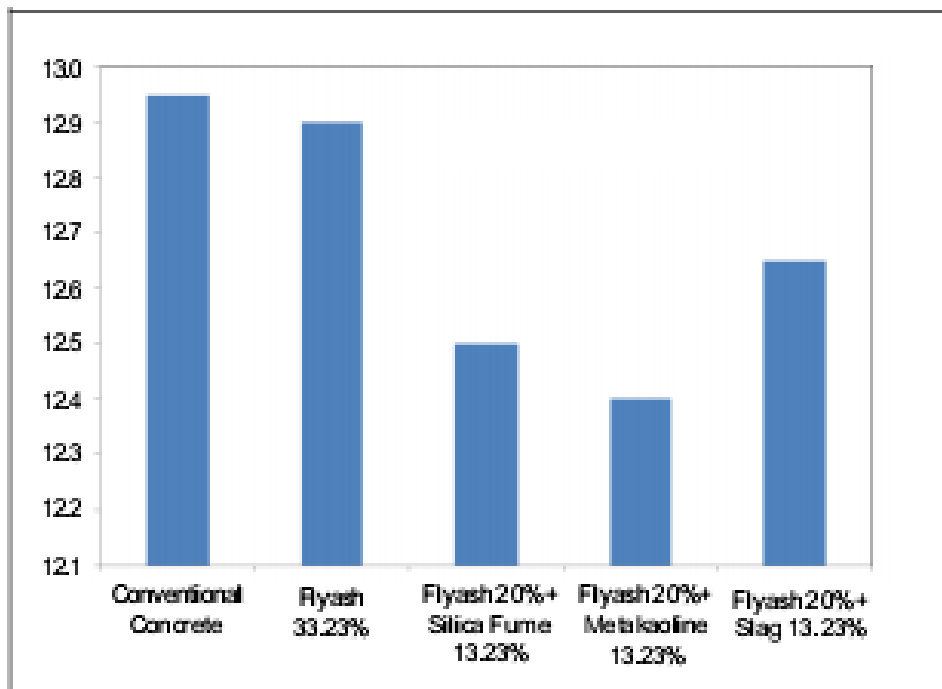


Figure I.33: Perte relative de la résistance de BHP M₈₀ en % **M Vijaya Sekhar Reddy et al.**

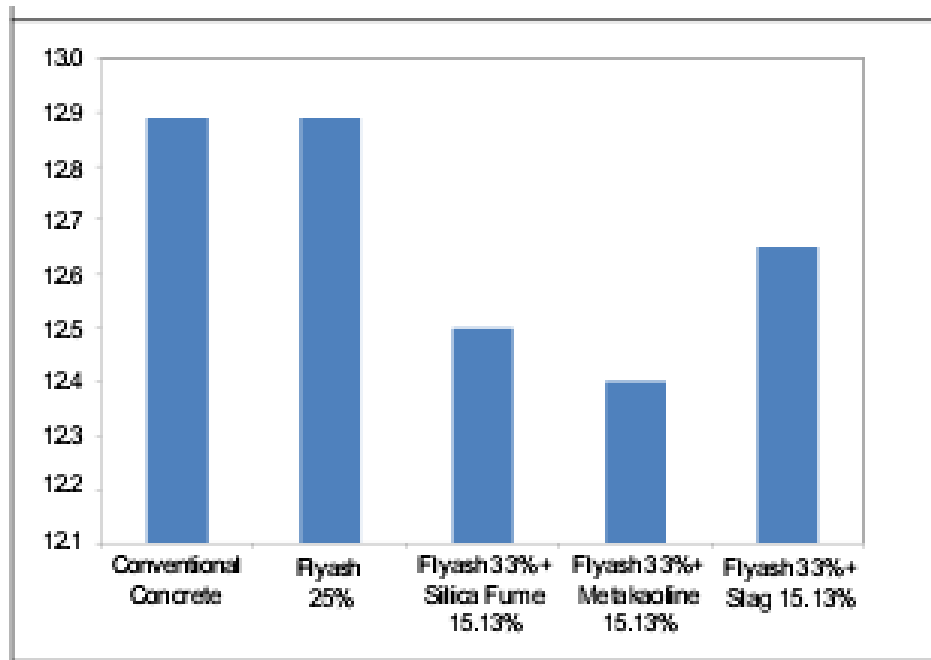


Figure 34 : Perte relative de la résistance de BHP M₉₀ en % **M Vijaya Sekhar Reddy et al.**

B. B. Patil [39], L'incorporation de 7,5 % de métakaolin dans le ciment renforce également la résistance face à l'attaque des sulfates de magnésium. La résistance à la compression du BHP contenant 7,5 % de métakaolin (HRM), comme illustré dans la [figure I.35](#), ne diminue que de 6,01 % après 180 jours d'immersion dans une solution de 5 % de $MgSO_4$, tandis que l'échantillon témoin subit une réduction de 9,29 %.

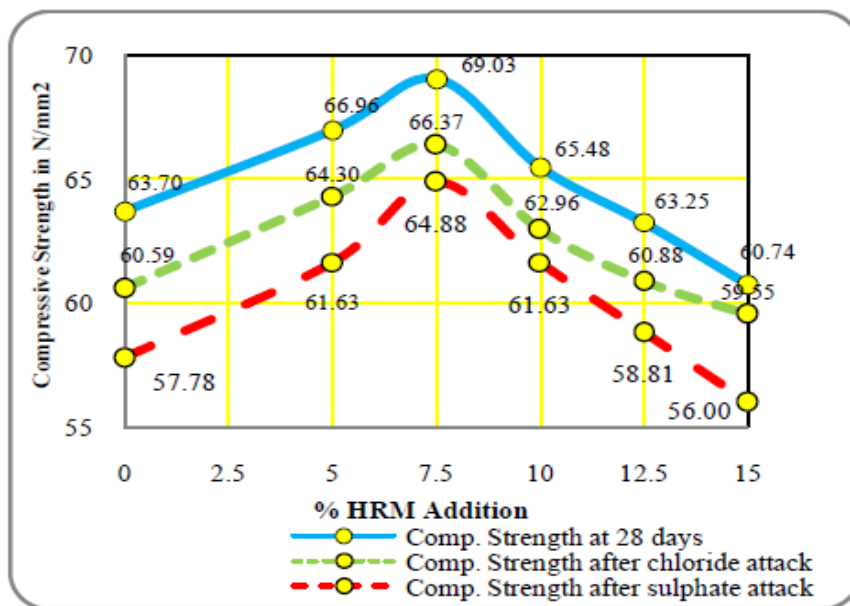


Figure I.35 : Comparaison Evolution de la résistance à la compression **B. B. Patil [39].**

Les figures 36 (a) et (b) démontrent une baisse de la résistance à la compression des échantillons de béton plongés dans une solution composée de 5 % de sulfate de magnésium (MgSO_4) et de 5 % de NaCl_2 , ainsi que d'un mélange de 5 % de MgSO_4 et 5 % de NaCl_2 . La diminution la plus significative a été notée pour l'essai de mélange, atteignant 15 % après 180 jours d'attaque. **Sayed, A. E et al [65]**.

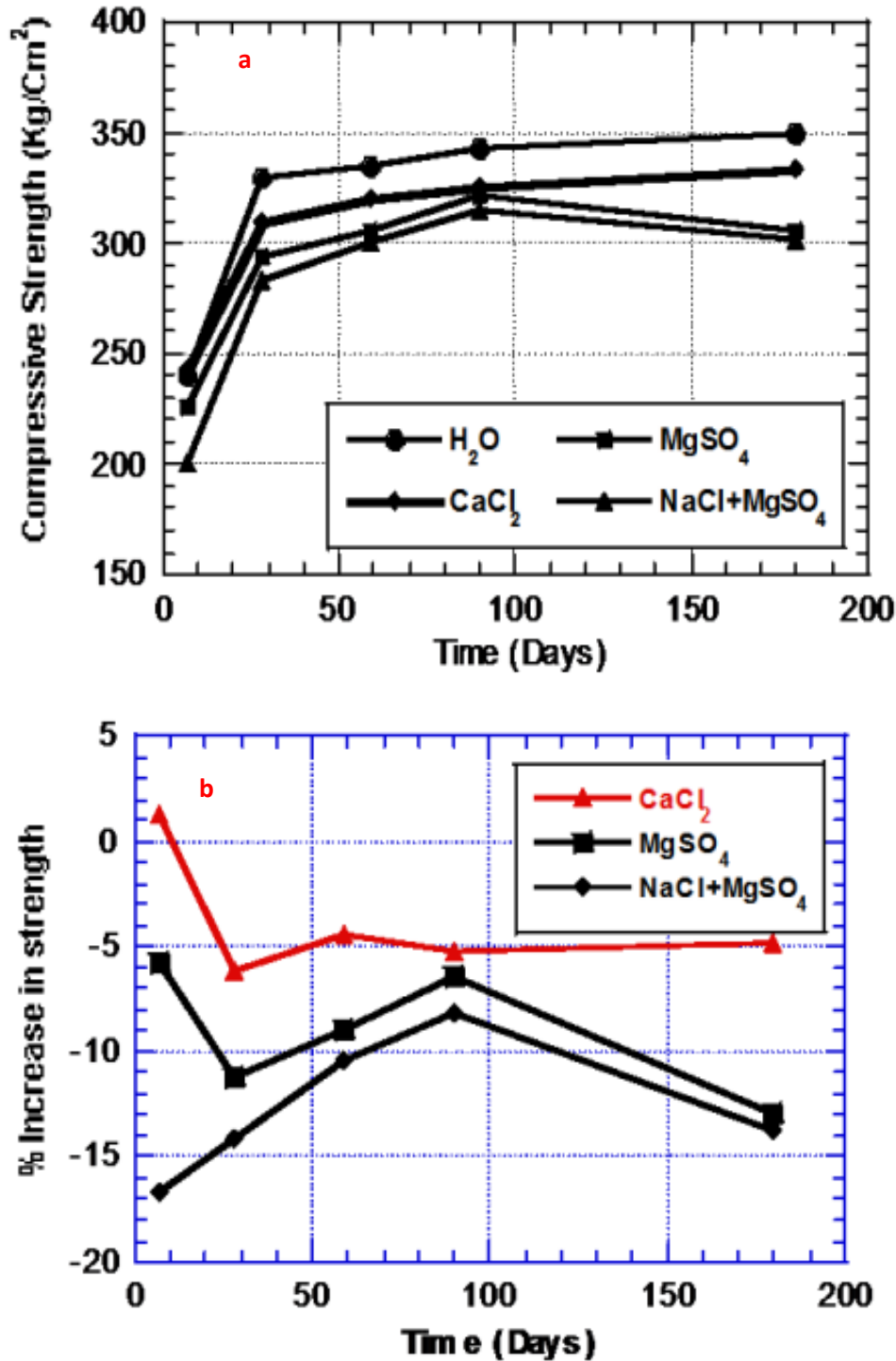


Figure I. 36: (a) Variation de la résistance à la compression des échantillons de béton (b) Taux de variation de la résistance **Sayed, A. E et al [65]**.

Diego Jesus de Souza et al [59], ont démontré, dans une recherche, l'impact des agressions extérieures causées par les sulfates de Na_2SO_4 et MgSO_4 sur des mortiers élaborés à partir de Ciment Portland CPV-ARI, enrichis de fumée de silice, qui contient 92,35 % de SiO_2 , ainsi que de cendres de coques de riz (RHA), composées de 88,47 % de SiO_2 , avec un remplacement de 10 % du ciment en poids dans les deux cas. Les échantillons de mortier SF et RHA ont une composition minéralogique relativement proche, les deux sont des matériaux très siliceux et avec une faible teneur en aluminates, d'environ 2% de leur masse. Il a été observé que le comportement des mortiers à base de SF et de RHA face à une attaque par sulfate est similaire et la substitution des deux matériaux améliore la résistance dans les deux solutions agressives figures I.37, 38, 39, 40 et 41. Pour la solution d'exposition à l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, les diagrammes de diffraction des rayons X (DRX) montrent que le RHA présente de faibles pics associés à la formation d'ettringite, ce qui témoigne de la présence résiduelle d'ettringite primaire, indiquant la présence de l'ettringite primaire restante.

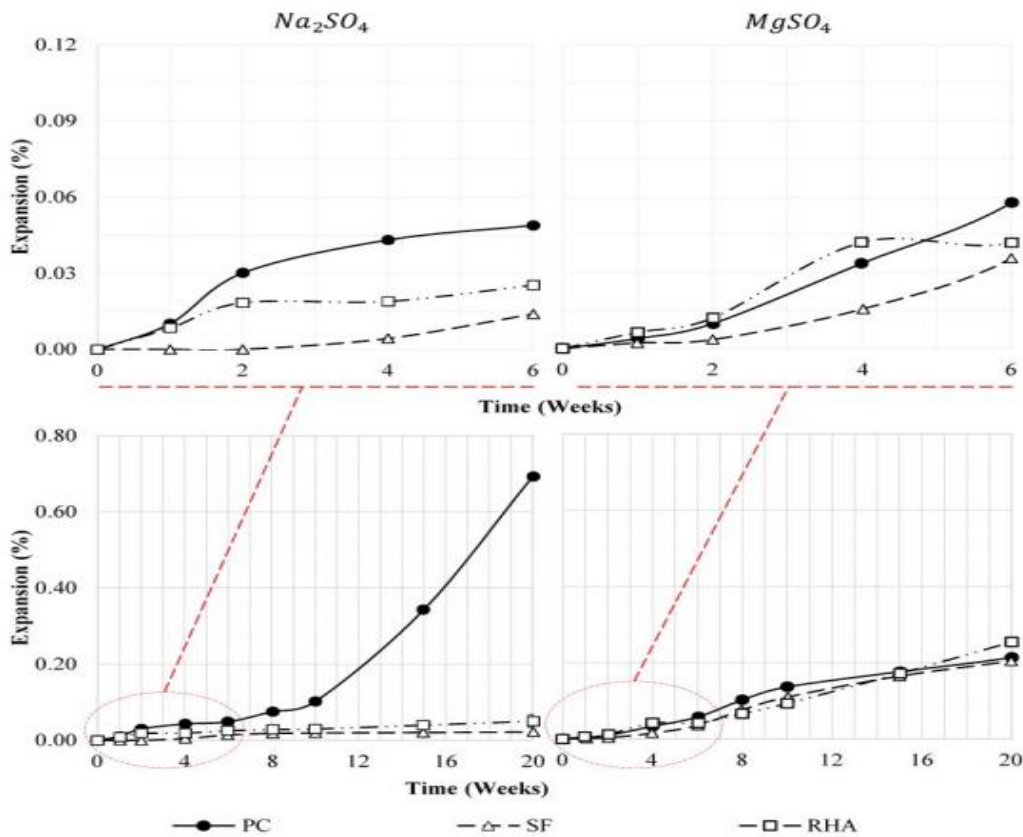


Figure I. 37 : Expansion des barres de mortier PC, SF et RHA soumises à des solutions de Na_2SO_4 et MgSO_4 (0,7 mol/L) pendant 42 et 140 jours (6 et 20 semaines) **Diego Jesus de Souza et al [59]**.

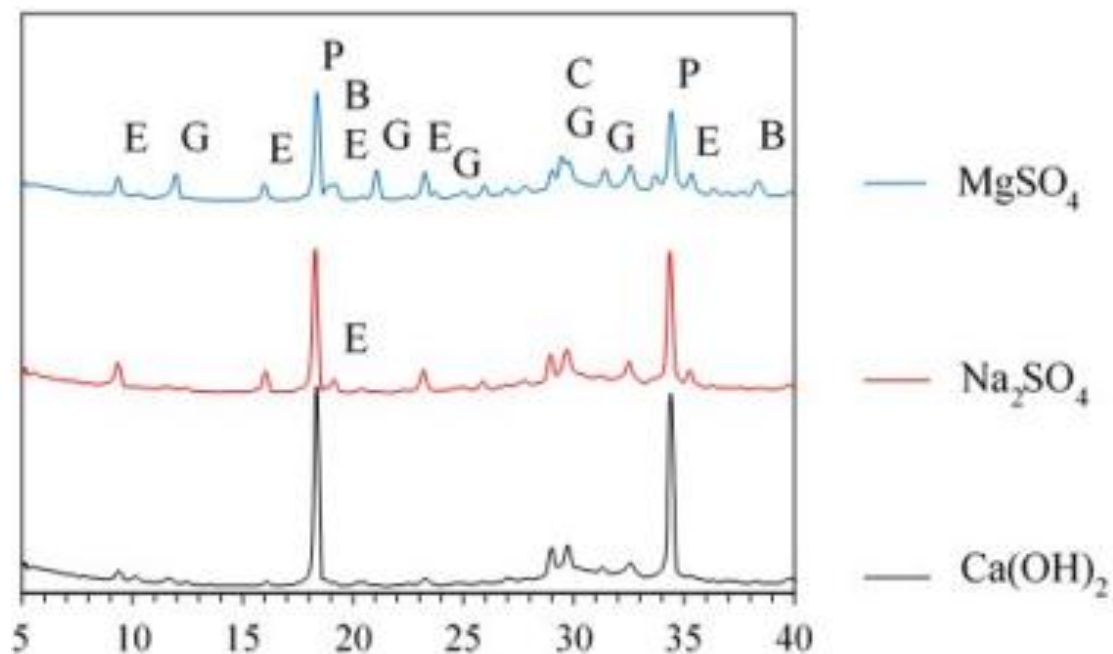


Figure I.38 : Diffractogrammes CP après 20 semaines d'exposition à Ca(OH)_2 , Na_2SO_4 et MgSO_4 . Monocarboluminate (A), brucite (B), calcite (C), ettringite (E), gypse (G) et portlandite (P) **Diego Jesus de Souza et al [59]**.

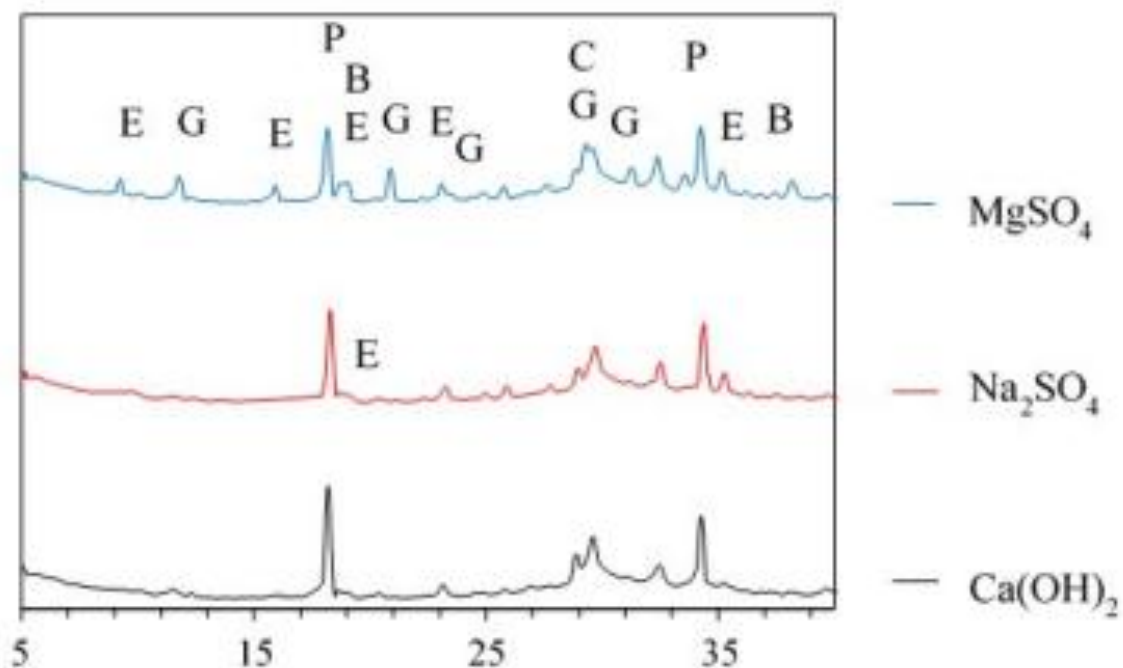


Figure I.39 : Diffractogrammes SF après 20 semaines d'exposition à Ca(OH)_2 , Na_2SO_4 et MgSO_4 . Monocarboluminate (A), brucite (B), calcite (C), ettringite (E), gypse (G) et portlandite (P) **Diego Jesus de Souza et al [59]**.

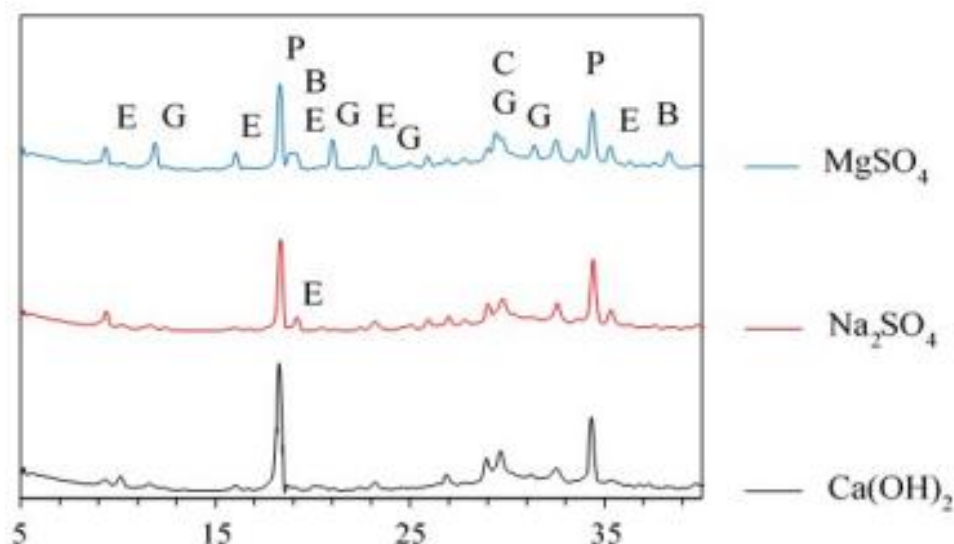


Figure I.40 : Diffractogrammes RHA après 20 semaines d'exposition à Ca(OH)_2 , Na_2SO_4 et MgSO_4 . Monocarboluminate (A), brucite (B), calcite (C), ettringite (E), gypse (G) et portlandite (P) **Diego Jesus de Souza et al [59]**.

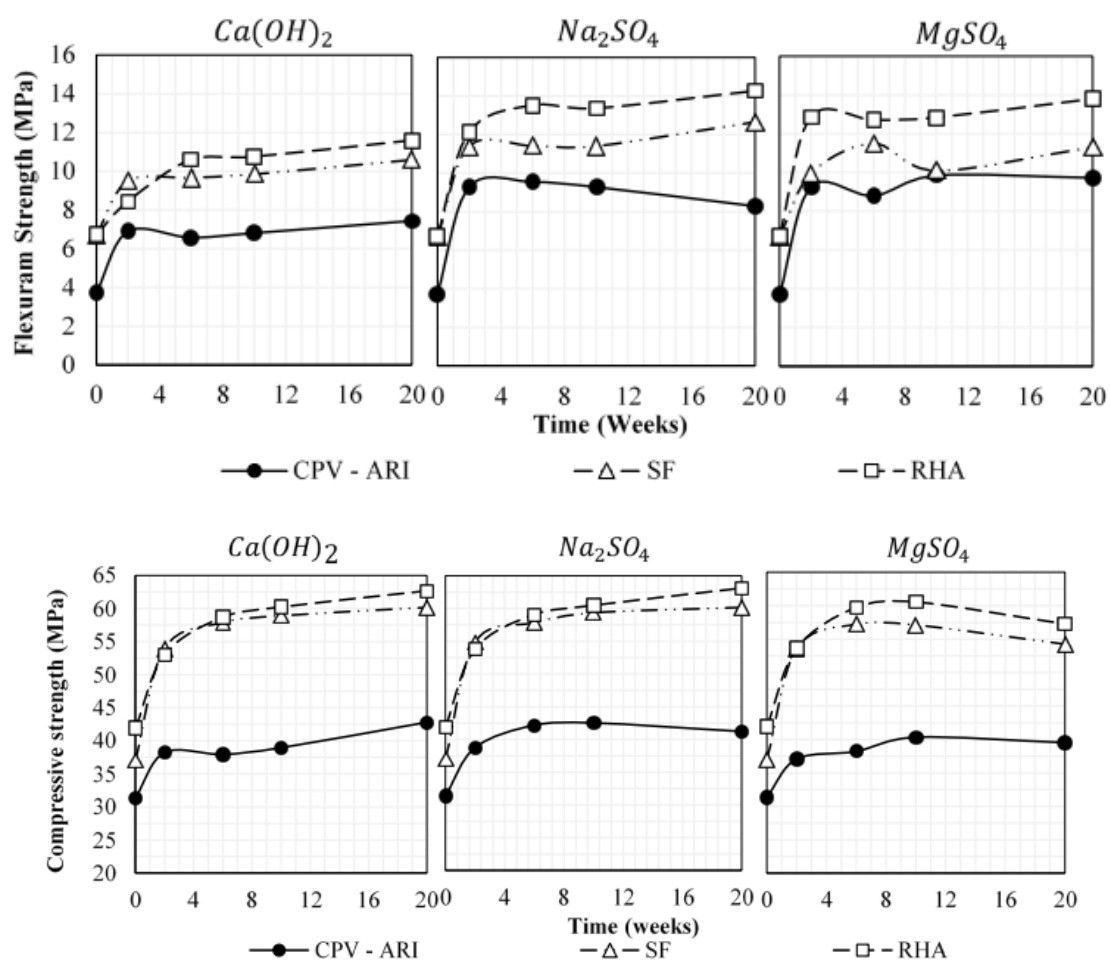
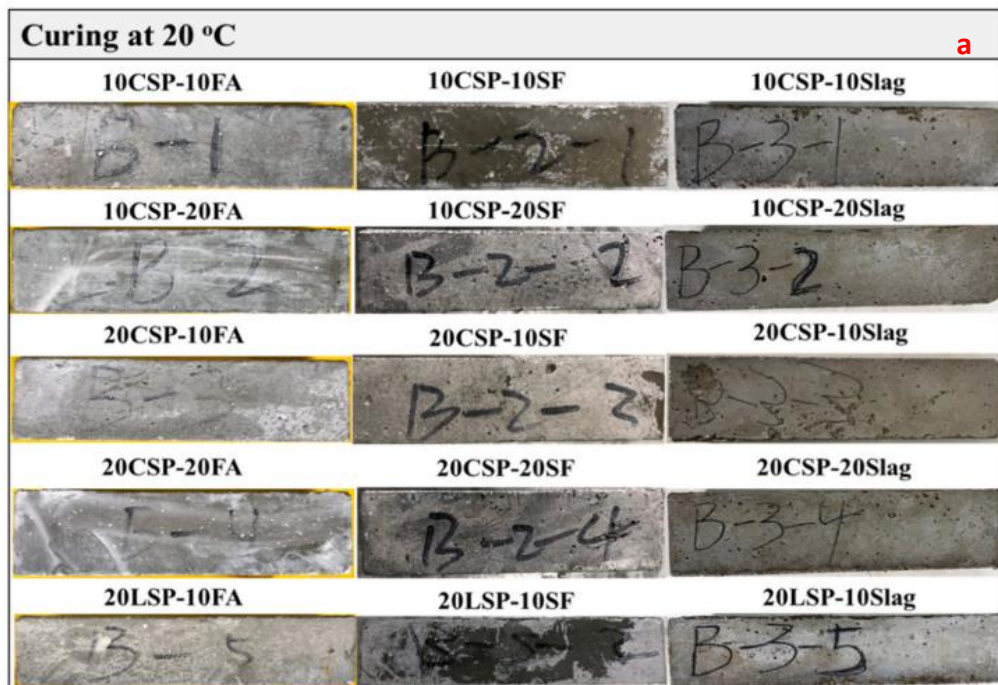


Figure I.41 : Résistance à la flexion et à la compression des échantillons jusqu'à 20 semaines d'exposition dans les trois solutions différentes [Ca(OH)_2 , Na_2SO_4 et MgSO_4] **Diego Jesus de Souza et al [59]**.

Xinjun Song et al [60] ont examiné la résistance des mortiers aux attaques de sulfates, en utilisant du sable de corail (coral sand filler) CSP, de la poudre calcaire LSP, ainsi que des ajouts minéraux tels que les cendres volantes FA, la fumée de silice SF et le laitier de haut fourneau granulaire (scorie Slag). L'étude a porté sur l'aspect visuel, les variations dimensionnelles de longueur, la porosité, la résistance à la compression et l'analyse par diffraction des rayons X afin de caractériser la résistance aux agressions du sulfate de sodium Na_2SO_4 à une température de 20 °C et à une température plus basse de 5 °C sur une période de 18 mois. Les résultats indiquent que la résistance aux sulfates des mortiers composés de poudre de sable de corail et de fumée de silice SF est supérieure à celle des mortiers élaborés avec de la poudre de sable de corail CSP - cendres volantes FA et de poudre de sable de corail CSP - laitier. De plus, à une température basse de 5°C, une détérioration plus prononcée des mortiers à base de poudre de sable de corail CSP a été observée par rapport aux mortiers à base de poudre de calcaire LSP, comme le montre le degré de dommage sévère constaté visuellement dans la [figure I.42](#) et selon la diminution de résistance à la compression [figure I.43](#). Aucune détérioration évidente n'a été observée dans les mortiers à une température de 20 °C et pendant une période allant jusqu'à 18 mois [figure I.42-a](#).



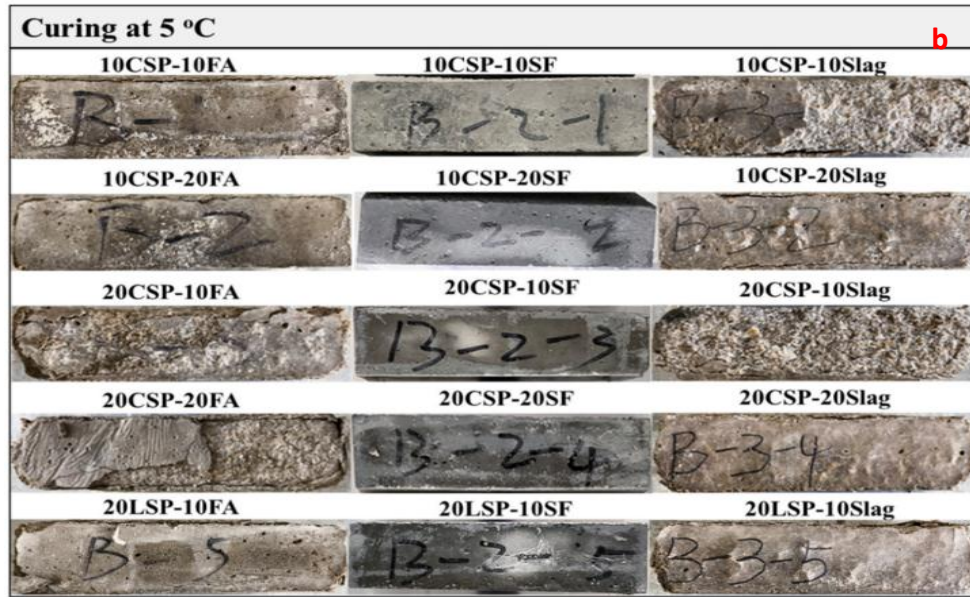


Figure. I.42. Etat des éprouvettes de mortiers à base de CSP-SCM et LSP-SCM stockés dans une solution à 5 % en poids de Na_2SO_4 à 20 °C et 5°C durant 18 mois **Xinjun Song et al [60]**.

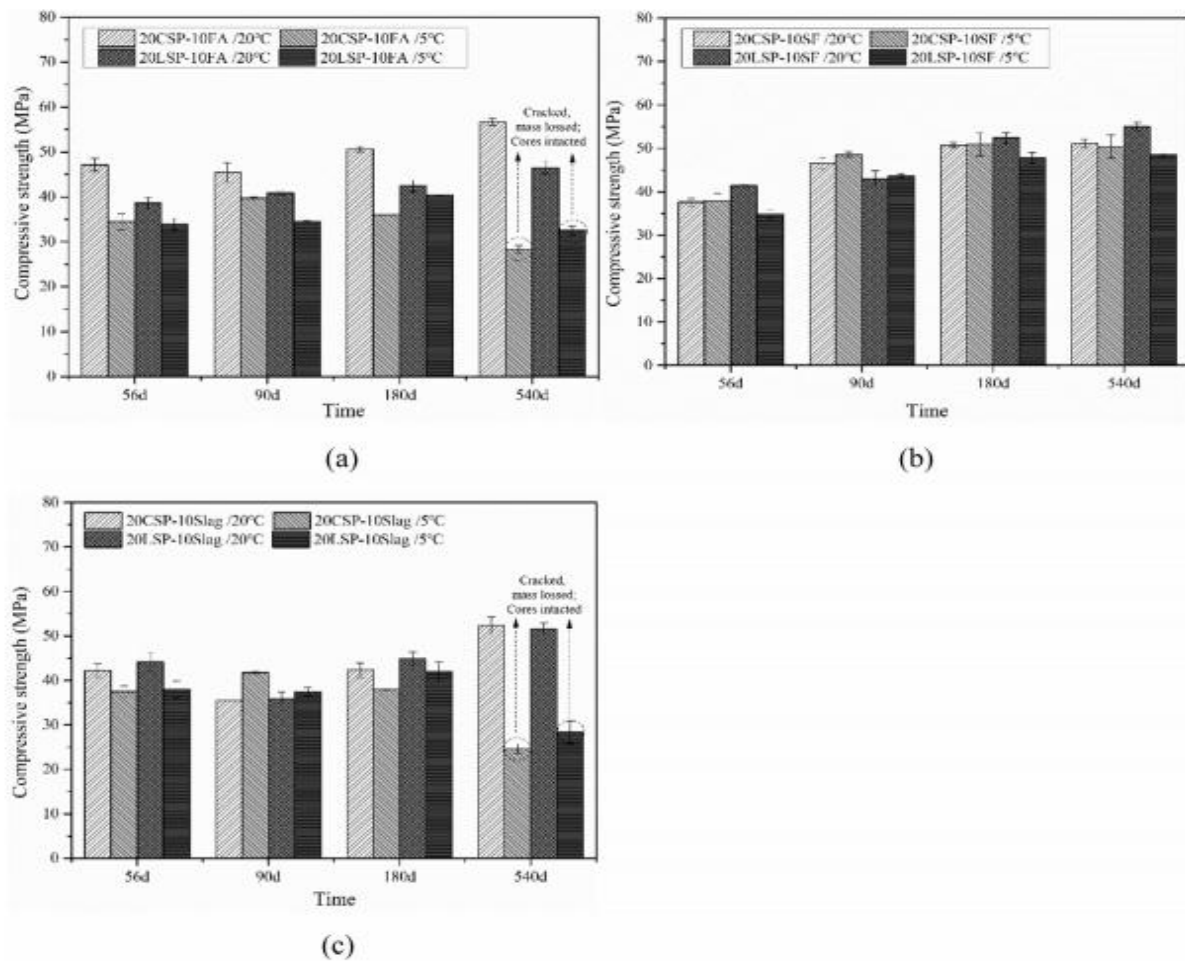


Figure. I.43 : Résistance à la compression des mortiers CSP-SCM comparée avec les mortiers LSP-SCM exposés à une solution de sulfate de sodium à 5 % en poids pendant une durée maximale de 540 jours **Xinjun Song et al [60]**.

Les mortiers CSP-FA et LSP-FA ont montré une résistance à la compression plus élevée à 20 °C qu'à 5 °C. Sous l'exposition aux attaques par sulfate à 20 °C, le mortier CSP-FA a montré une résistance à la compression plus élevée que le mortier LSP-FA jusqu'à 540 jours. À une température de 5 °C, la résistance à la compression du mortier CSP-FA atteint des niveaux supérieurs avant 90 jours et plus faible après 180 jours par rapport au mortier LSP-FA. Cela indique que le mortier CSP-FA a une moindre résistance à l'agression des sulfates à une température de 5 °C.

La diffraction des rayons X (DRX) indique que la thaumasite se cristallise dans les mortiers à base de poudre de sable de corail CSP, après avoir été exposés à une solution de sulfate de sodium à 5 °C pendant 540 jours, comme le montre la [figure I.44](#).

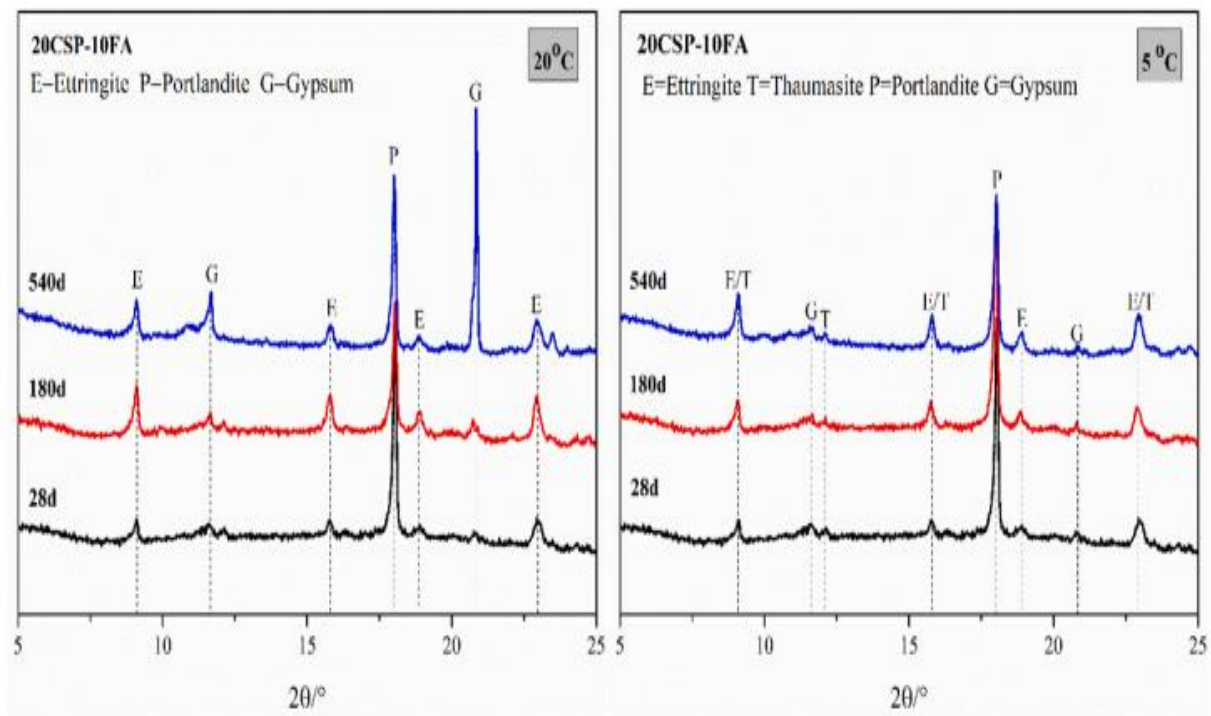


Figure I. 44 : Représentations de la diffraction des rayons X des mortiers intégrant des CSP et des FA soumis à une solution de sulfate de sodium à 5 % sous l'effet des températures 20 °C et 5 °C pendant 540 jours maximum [Xinjun Song et al \[60\]](#).

La [figure I.45](#) Présente les images SEM des mortiers contenant du CSP ainsi que des FA, SF et laitier (slag), immergés dans une solution de sulfate de sodium à 5 % à une température de 5 °C pendant une durée de 540 jours. Conformément à la [figure I.42 \(a\)](#) la morphologie de C–S–H de l'échantillon CSP-FA présenté sous forme réticulaire ou en nid d'abeille, et sous forme spongieuse dans la [figure I. 45 \(b\)](#). Cela suggère que la thaumasite attaque les mortiers

qui contiennent des CSP et des FA, SF et laitier (slag) peut entraîner une détérioration ainsi et la transformation de la structure du CSH.

La Figure I.45 (b) et (c) illustre une transformation de la morphologie de la portlandite, passant de grandes plaques à de petits cylindres. Cette évolution est particulièrement marquée dans l'échantillon CSP-Slag. Cela signifie que l'attaque de la thaumasite sur les mortiers contenant des CSP et des FA, SF et laitier (slag) pourrait entraîner une morphologie cristalline plus détériorée de la portlandite.

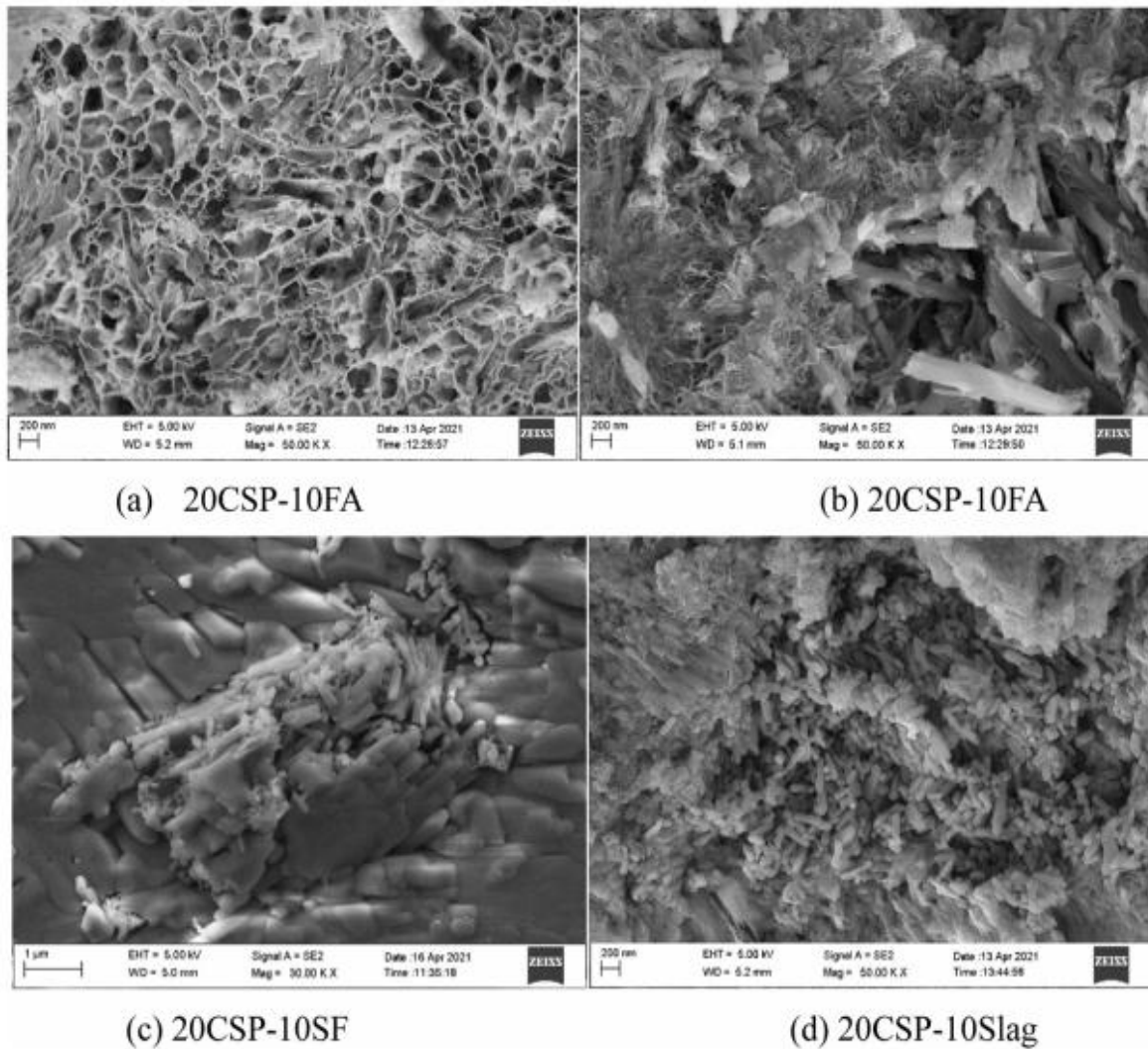


Figure I. 45. Images SEM de mortiers composés de CSP, FA, SF et laitier (slag), exposés à une solution de sulfate de sodium à 5 % en poids à 5 °C pendant 540 jours, entraînant une corrosion **Xinjun Song et al [60]**.

I.5. Perméabilité aux gaz :

La performance mécanique et la durabilité des bétons ont été étudiées par de nombreux chercheurs. La perméabilité constitue un indicateur essentiel pour évaluer la résistance d'un béton face à l'infiltration d'agents agressifs, car il existe un lien direct entre la perméabilité et la durabilité du béton [41], [42]. En règle générale, la perméabilité au gaz d'un matériau poreux est supérieure à celle observée avec un liquide. En 1941, **Klinkenberg** [43] a conclu que cette observation s'explique par le glissement des molécules gazeuses à l'interface gaz-solide.

I.5.1 Détermination de la perméabilité aux gaz :

- **Principe d'essai :** l'évaluation est effectuée selon les directives de la norme **XP—P18-463** [49] ; le principe sur lequel repose l'essai est de soumettre l'éprouvette en béton à une charge constante et de mesurer en régime permanent, le débit de gaz évacuant par l'éprouvette cylindrique.

Le système de mesure est illustré dans la figure I.46.

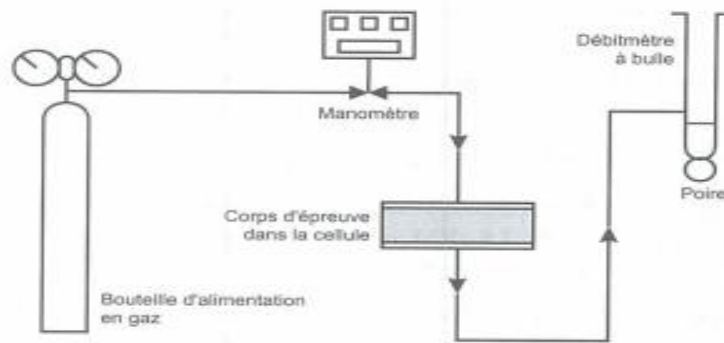


Figure I.46: Système de mesure de la perméabilité des gaz.

Equations :

- **Perméabilité au gaz K :**

L'évaluation de la perméabilité au gaz d'un milieu s'appuie sur la loi de Darcy :

$$V = \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

V : vitesse d'écoulement exprimée en m/s

μ : est la viscosité dynamique en Pa.s .

grad dp : gradient de pression en Pa.s/m.

Soit l'écoulement unidimensionnel voir [figure I.47](#), le débit d'un liquide s'écrit sous la forme suivant :

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta P}{\mu \cdot L} \quad \text{avec} \quad V = Q/A$$

V : représente la vitesse d'écoulement.

A : désigne la section en mètres carrés (m²).

L : correspond à la longueur de l'échantillon dans la direction de l'écoulement, exprimée en mètres (m).

ΔP : indique la différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'échantillon, mesurée en pascals (Pas).

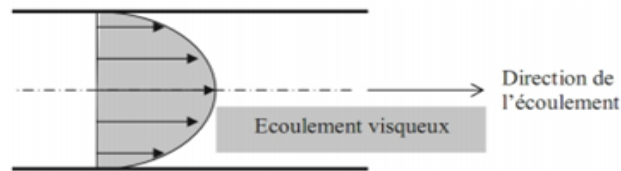


Figure I.47: Distribution des vitesses d'un fluide visqueux à l'intérieur d'un tube capillaire.

D'après la loi de Darcy, la vitesse d'écoulement des fluides aux extrémités des parois d'un tube capillaire est égale à zéro. Cependant, dans le cas d'un gaz, cette vitesse à l'extrémité devient non nulle, ou il s'ajoute un écoulement de glissement lié au phénomène de non adhérence du gaz avec les parois appelé effet de **Klinkenberg** voir [figure I.48](#).

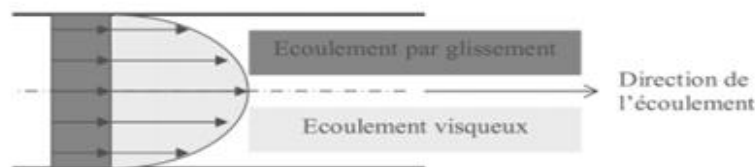


Figure I.48: distribution des vitesses d'un gaz dans un tube capillaire.

L'accroissement de l'écoulement par glissement entraîne une hausse de la perméabilité au gaz, laquelle est influencée par la nature du gaz, le niveau de pression et la microstructure du milieu [\[50\]](#). La perméabilité aux gaz est calculée à l'aide de l'équation (1) [\[49\]](#), fondée sur la loi de Darcy et l'équation de **Hagen-Poiseuille**, qui postulent un régime d'écoulement laminaire permanent et un fluide compressible.

$$K = \frac{2 \cdot P_0 \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{A \cdot (P_a^2 - P_0^2)} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{V}{t_{moy}}$$

- Notations :

P_0 : pression absolue atmosphère, exprimée en Pascals

P_a : pression absolue à l'entrée, exprimée en Pascals

P_1 : pression absolue à la sortie, exprimée en Pascals

Q : débit volumique, mesuré en m^3/s

L : épaisseur de l'éprouvette, en mètres

A : section de l'éprouvette, en mètres carrés

μ : viscosité dynamique du gaz en $Pa.s$ à $(20^\circ C \pm 2^\circ C)$,

V : volume mesuré sur le débitmètre à bulle de savon, en m^3

t_{moy} : temps de parcours moyen, exprimé en secondes.

- Taux de saturation S_r en % :

La perméabilité des bétons aux gaz dépend de la teneur en eau de l'éprouvette, et cette perméabilité s'accroît avec le processus de séchage du matériau. À l'inverse, la perméabilité à l'eau augmente lors de la saturation en eau. [49], [50]. La figure suivante montre une représentation de transfert gaz et eau à l'échelle microscopique (Verdier 01) [51] voir figure I. 49. À un instant donné, le taux de saturation en eau S_r d'une éprouvette est défini par l'équation suivante :

$$S_r(\%) = \frac{M - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sec}} \cdot 100$$

M_{sat} : masse de l'éprouvette saturée, exprimée en kg

M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche, exprimée en kg

M : masse de l'éprouvette à une échéance donnée, exprimée en kg

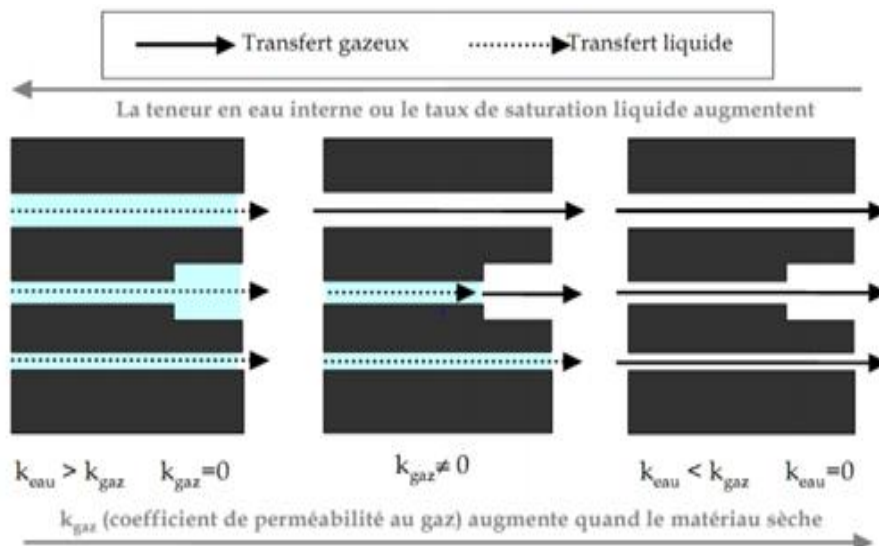


Figure I.49: Illustration schématique de l'impact de la saturation sur les transferts gazeux (Verdier) [51].

I.5.2 Revues bibliographies

Véronique BAROGHEL-BOUNY(1998) [44] a réalisé une étude expérimentale comparative sur les transferts gazeux entre les bétons ordinaires et les bétons à hautes performances. Les résultats indiquent qu'à un moment donné, le coefficient de perméabilité au gaz des bétons à haute performance est inférieur à celui des bétons ordinaires. De plus, il a été observé que la perméabilité augmente lorsque le taux de saturation moyen du béton diminue, des constatations similaires étant également présentes dans la littérature. (zine el-Albidine et al) [45] voir figure I.50.

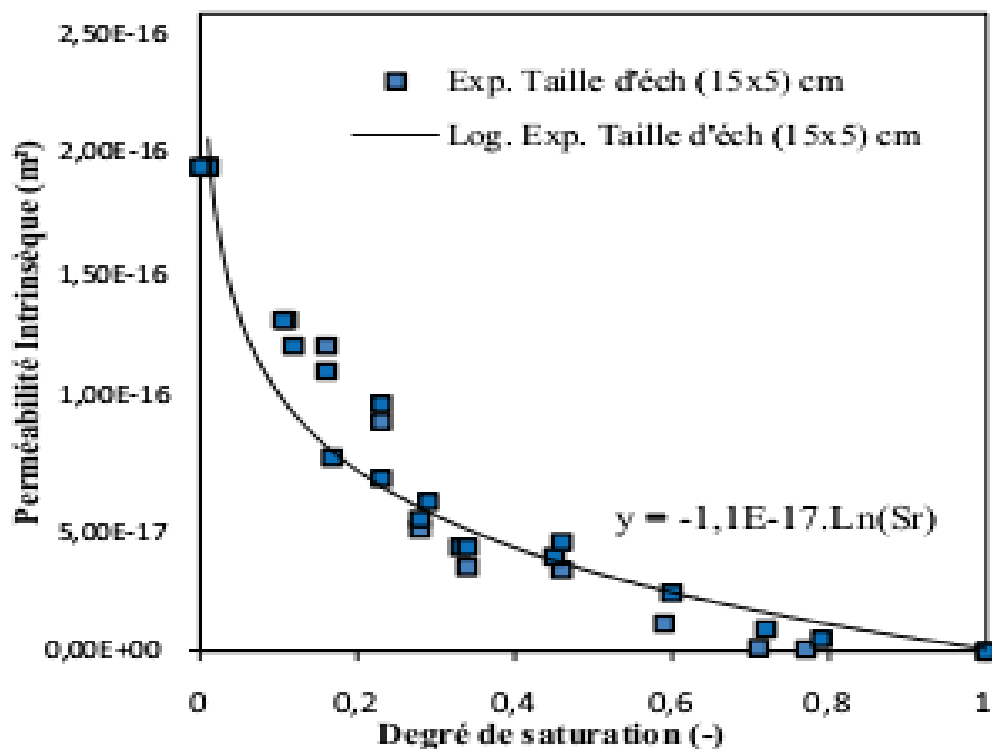


Figure I. 50 Perméabilité intrinsèque du béton en en fonction de taux de saturation zine el-Albidine [45]

Véronique BAROGHEL-BOUNY et al [46], ont mené une étude complémentaire sur la durabilité de quinze types de bétons, dont la résistance à la compression varie de 20 à 120 MPa. Les résultats indiquent une diminution significative de la perméabilité lorsque l'on compare les bétons ordinaires aux bétons à hautes performance (BHP) contenant des fumées de silice. On observe un écart presque centuple entre la perméabilité maximale de $978 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ (associée au béton M25) et la perméabilité minimale de $17 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ (liée au béton M100FS), comme

illustré dans la figure I.51. Il n'existe pas de relation simple entre la perméabilité à l'air (K_{gaz}) et la résistance à la compression moyenne à 28 jours. Ainsi, la résistance à la compression ne permet pas de prédire de manière systématique les propriétés de transport des matériaux, et par conséquent leur durabilité. D'autres facteurs doivent être pris en compte, tels que les paramètres de formulation (taux d'additions pouzzolaniques, présence d'air entraîné, etc.), où l'ajout d'une quantité significative de cendre volante a un effet positif en réduisant le transfert gazeux dans le béton. En revanche, l'utilisation d'un entraîneur d'air augmente la perméabilité au gaz du béton.

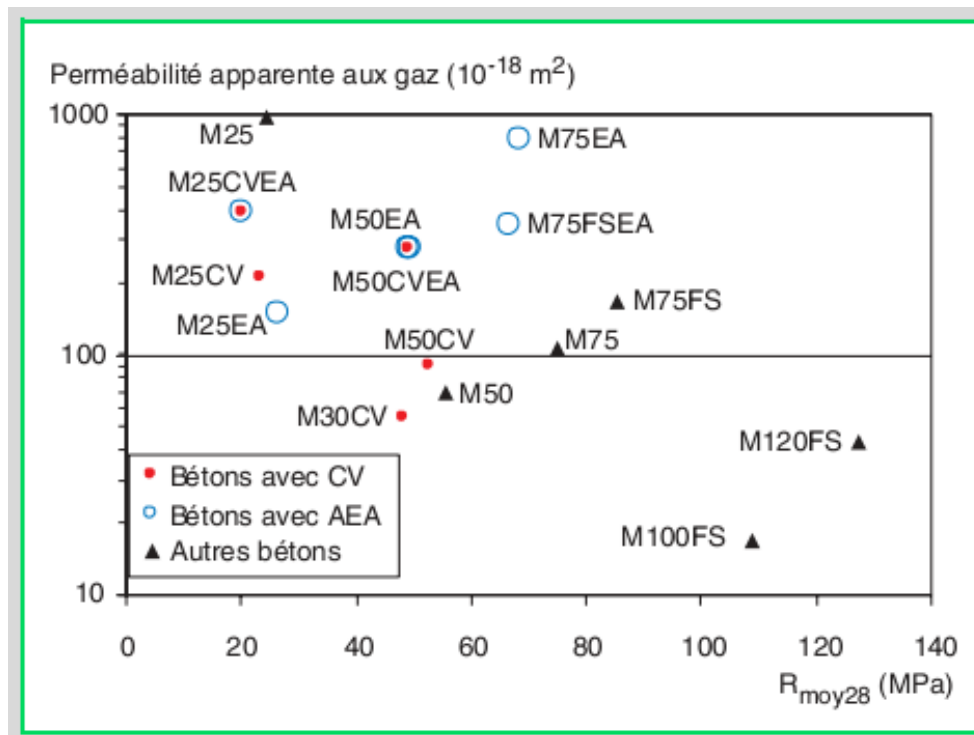


Figure I.51 : Evolution de la perméabilité apparente aux gaz des 15 types de bétons en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours **Véronique BAROGHEL-BOUNY et al [46].**

Tsimbrorska et al [47], ont examiné l'impact de la température sur la perméabilité au gaz des bétons ordinaires, des bétons à haute performance, ainsi que des mortiers ordinaires et à haute performance. Les échantillons ont été soumis à un traitement thermique jusqu'à atteindre une masse constante, à des températures variant de 105 °C à 400 °C. Les résultats indiquent que, de manière générale, la perméabilité au gaz pour toutes les compositions de bétons et de mortiers s'accroît avec la température de séchage, comme illustré dans la figure I.52.

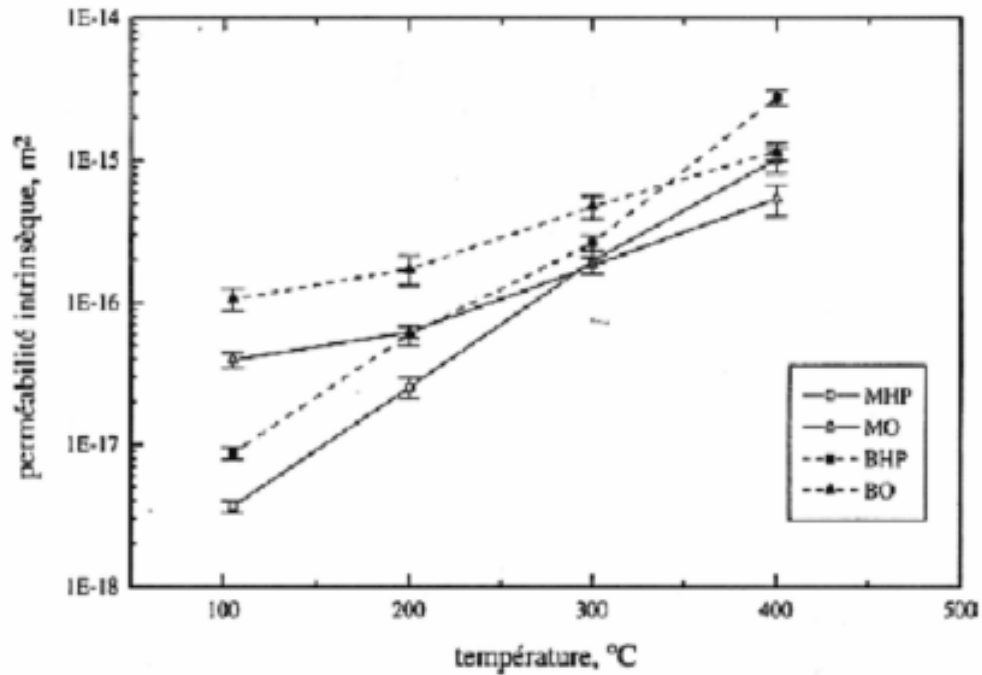


Figure I.52: Impact de la température sur la perméabilité intrinsèque des mortiers et des bétons, qu'ils soient ordinaires ou de haute performance [Tsimbrorska \[47\]](#).

[Wei Chen et al \[48\]](#) s'intéressent dans une étude sur la mesure de la perméabilité aux gaz des bétons hautes performances (BHP) et des mortiers dans les structures souterraines, en se concentrant spécifiquement sur les alvéoles destinées au stockage des déchets nucléaires (voir [figures I.53 et I.54](#)). Ces structures ont pour fonction principale d'assurer l'étanchéité, et la mesure de leur perméabilité au gaz est un facteur pouvant affecter leur durabilité. Cette recherche s'inscrit dans le cadre des travaux de l'Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs (Andra). En réalité la réalisation de structures souterraines est rarement saine, elles sont toujours endommagées, un développement des fissures au sein de matériau modifiées ces caractéristiques et par conséquent sa propriété de transfert (endommagement du matériau est lié aux divers phénomènes mécaniques et chimiques).

Cette étude vise à quantifier les valeurs de perméabilité au gaz sous l'influence de l'eau (saturation), des fluctuations de température, ainsi que de l'effet des microfissures et macrofissures. Les résultats révèlent que, pour les échantillons en bon état, la perméabilité au gaz des bétons sains tend à diminuer avec l'augmentation du taux de saturation en eau S_r et de l'humidité. Ainsi, une excellente résistance au transfert en température élevée pour un béton sain initialement sec, tandis que la perméabilité au gaz pour un béton saturé partiellement montre un effet de bouchon jusqu'à 105°C car le gaz ne peut passer car la vapeur d'eau forme

un bouchon au sein de matériau. En outre l'application des cycles chaud froid met en lumière l'importance de la saturation initiale S_r des échantillons. La perméabilité au gaz demeure inchangée malgré les variations de température (5°C - 20°C - 30°C - 50°C) pour un béton initialement sec. Une déstabilisation de la perméabilité pour les échantillons partiellement saturés se manifeste, les valeurs de perméabilité étant plus faibles lorsque le matériau est refroidi à une température de 5°C . Les échantillons macro-fissurés : Les valeurs de perméabilité au gaz des bétons présentant des macro-fissures dépendent principalement des niveaux de pression de confinement, tandis que l'impact de la pression d'injection est négligeable. Par conséquent, une augmentation de la température jusqu'à 200°C n'a pas eu d'effet sur la perméabilité au gaz sous une contrainte constante. Les résultats montrent aussi que l'application des cycles gel/dégel provoquent une augmentation de la perméabilité au gaz au sein de échantillons macro-fissurés.

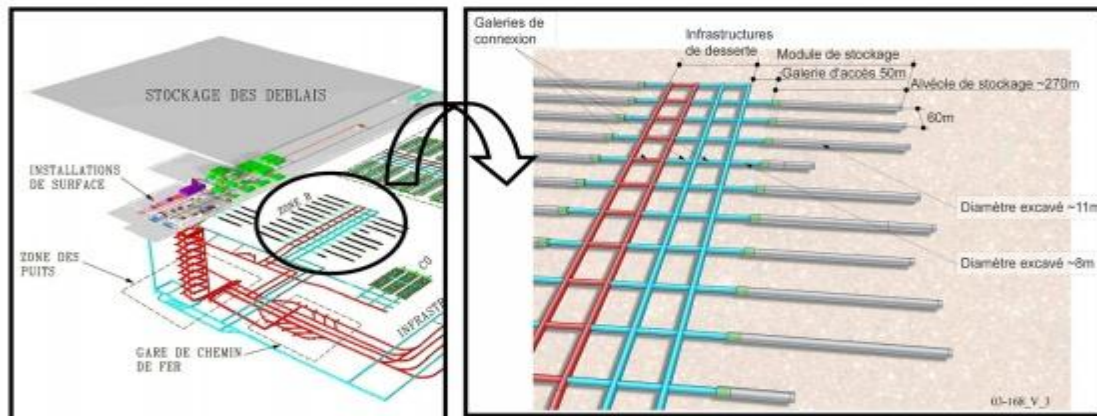


Figure I.53 : Schéma du site de stockage souterrain, avec un agrandissement sur la zone des déchets **Wei Chen et al [48]**.

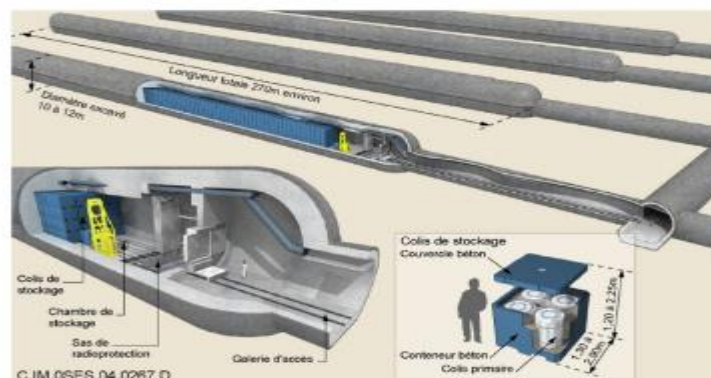


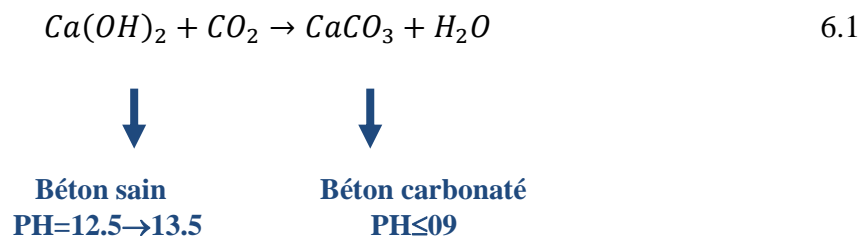
Figure I.54 : Schéma d'une alvéole de stockage de déchets **Wei Chen et al [48]**.

I.6 Carbonatation du béton:

La corrosion des barres d'armature dans les structures en béton soumises à l'atmosphère est principalement causée par la carbonatation du béton, ce qui entraîne une baisse du $\text{pH} \leq 9$ **Véronique BAROGHEL-BOUNY [52]**. Les armatures protégées par un enrobage en béton sont naturellement résistantes à la corrosion, en raison d'un milieu initialement très basique ($\text{pH} \approx 12$ à 13). Toutefois, certains agents agressifs ont la capacité de traverser le béton de protection et d'atteindre l'armature. La carbonatation du béton, provoquée par le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2), est l'une des causes majeures de ce phénomène. Ce processus de carbonatation se traduit par la neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté, notamment la Portlandite et les CSH, par le dioxyde de carbone qui se trouve naturellement dans l'air à une concentration d'environ 0,035 % en volume **Akli YOUNS [53]**.

Selon des évaluations du cycle de vie des ouvrages en béton, près de 85 % des émissions de CO_2 proviennent de la production de ciment [Parrott, 2002].

L'équation représentant la réaction de carbonatation de Ca(OH)_2 peut s'écrire comme suit **Véronique BAROGHEL-BOUNY[52]** :



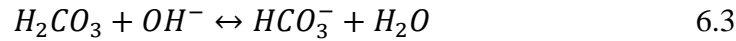
I.6.1 Propagation du CO_2 dans le béton et sa dissolution dans la solution interstitielle.

Akli YOUNSI [53], le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le béton sous l'influence d'un gradient de concentration et se dissout dans la solution interstitielle. La forme du CO_2 en solution varie en fonction du pH de cette dernière:

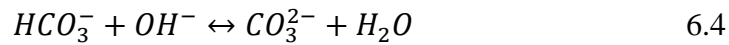
- **Il se forme de l'acide carbonique si $\text{pH} < 4$** : La formation d'acide carbonique se produit lorsque le pH est inférieur à 4.



- **Il se forme de l'ion bicarbonate si $6 < \text{pH} < 10,5$**



- Il se forme de l'ion carbonate si $pH > 10,5$



Dans le cas de bétons en bon état, cette configuration est la plus courante, avant toute forme d'attaque chimique.

I.6.2 Carbonatation de la Portlandite :

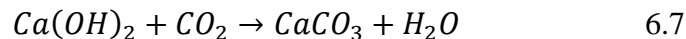
Simultanément à la réaction (6.4) où les ions hydroxyle (OH^-) sont utilisés, les ions carbonate CO_3^{2-} réagissent avec les ions calcium (Ca^{2+}), présents naturellement en raison de la dissolution partielle de la Portlandite (équilibre chimique), comme l'indique la réaction suivante :



Cela engendre un déséquilibre chimique qui facilite la dissolution de la Portlandite :

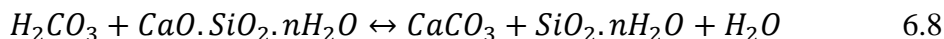


Le processus de carbonatation de la Portlandite est fréquemment résumé par l'expression suivante :



I.6.3 Carbonatation des silicates de calcium hydratés CSH

Ngoc Tru VU[54], la formulation de la réaction chimique des C.S.H (indiqués par $CaO.SiO_2.nH_2O$) en interaction avec le dioxyde de carbone peut être écrite comme suit. :



La carbonatation de la portlandite et celle des silicates de calcium hydratés se produisent simultanément, bien que la portlandite présente une cinétique plus rapide. Les tests de carbonatation effectués sur de la pâte de ciment hydratée, puis broyée, révèlent que les particules de $Ca(OH)_2$ et de CSH sont recouvertes d'une couche de carbonate de calcium, ce qui ralentit la dégradation de ces hydrates.

I.6.4 Les facteurs clés affectant la carbonatation des bétons

Akli YOUNSI [53], la cinétique de carbonatation des bétons est influencée par une multitude de paramètres liés aux caractéristiques des bétons et à leur milieu environnant.

- **Rapport eau/ciment (E/C) :** La vitesse de carbonatation est faible avec la diminution rapport E/C
- **Additions minérales :** Les ajouts minéraux tels que les cendres volantes, les laitiers de haut-fourneau ou les pouzzolanes produisent des bétons contenant une faible quantité de Portlandite, qui est un produit pouvant se carbonater.
- **Résistance à la compression :** il est à noter que la profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance à la compression augmente.
- **Perméabilité au gaz :** Une réduction de la perméabilité au gaz entraîne une diminution de la profondeur de carbonatation.
- **Degré de saturation des pores en eau liquide :** Un degré de saturation insuffisant limite considérablement la dissolution du CO₂, ce qui entraîne un ralentissement de la cinétique de carbonatation des hydrates.
- **Cure :** Une cure effectuée dans l'eau favorise l'hydratation du ciment, ce qui réduit la porosité du béton et améliore sa résistance à la carbonatation.
- **Humidité relative :** Lorsque l'humidité relative est inférieure à 50 %, ou supérieure à 90 à 95 %, la vitesse est considérablement réduite ou nulle.
- **Concentration en CO₂ :** Des recherches indiquent qu'une élévation de la concentration en CO₂ accroît la vitesse de carbonatation du matériau cimentaire.
- **Température :** L'augmentation de la température exerce deux effets contradictoires sur la vitesse de carbonatation : d'une part, elle accélère les réactions chimiques et favorise le séchage des pores, facilitant ainsi l'accès du CO₂ au réseau poreux. D'autre part, elle réduit la solubilité du CO₂ et diminue sa concentration dans la phase gazeuse.

I.6.5 Principales conséquences de la carbonatation

- Diminution du pH :

La carbonatation entraîne principalement une diminution du pH, due à la dissolution de la Portlandite dans la solution interstitielle. Cette diminution du pH altère la couche passivante, provoquant la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le pH atteint environ 9 à la profondeur d'enrobage. Le modèle conceptuel de la corrosion par carbonatation (ou pénétration des chlorures) des aciers dans le béton armé (figure I. 55) démontre que les

mécanismes de corrosion se développent en deux étapes (Baroghel-Bouny, 2005) [53]. Concernant la carbonatation, on peut résumer :

- La phase d'incubation désigne la phase durant laquelle le CO_2 pénètre dans le béton, permettant ainsi l'apparition de processus physico-chimiques susceptibles de provoquer la corrosion des armatures à un niveau microscopique. À ce stade, aucune dégradation n'est perceptible à l'échelle macroscopique. Elle peut donc être définie comme le temps nécessaire pour que les aciers perdent leur passivation en raison de la carbonatation.
- La phase de propagation est la phase durant laquelle la corrosion débute et des dégradations commencent à se manifester.

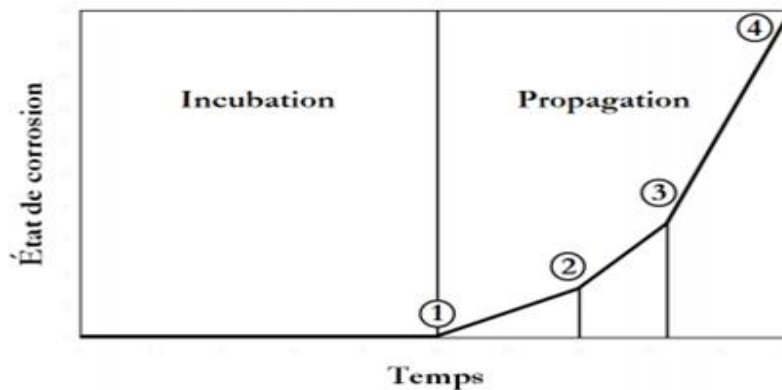


Figure I.55 : Diagramme de Tuutti modifié : (1) dépassivation des armatures, (2) apparition de fissures, (3) éclatement du béton en surface et (4) destruction. (Baroghel-Bouny, 2005) [53].

- **Modification de la porosité** : Variation de la porosité : La réaction de carbonatation des hydrates engendre une augmentation du volume de la phase solide.
- **Modification des propriétés mécaniques** : La modification des propriétés mécaniques des bétons au ciment CEM I révèle que leur résistance à la compression et à la flexion peut croître jusqu'à 30 % dans une atmosphère de CO_2 , par rapport à des bétons conservés dans un environnement sans CO_2 . Il est également important de souligner que la résistance mécanique après carbonatation est réduite lorsque la teneur en clinker des ciments est inférieure à 40 %.
- **Modification des propriétés de transfert** : La modification des propriétés de transfert : La réaction de carbonatation réduit le coefficient de diffusion effectif des gaz, cependant, la carbonatation naturelle ne semble pas influencer la perméabilité aux gaz ni celle à l'eau liquide.

I.6.6 Revues bibliographiques : Véronique BAROGHEL-BOUNY et al [55], ont étudié la carbonatation des quinze mélanges de bétons allant de 20 bars à 120 bars. Les profondeurs de carbonatation, mesurées sur des carottes prélevées à Melun, La Rochelle, Maurienne et au Canada, ont été comparées aux résultats obtenus sur des éprouvettes conservées en laboratoire dans l'eau. La **figure I.56** illustre cette comparaison des profondeurs de carbonatation entre les mesures sur site et celles en laboratoire. Les résultats montrent que la profondeur de carbonatation déterminée par l'essai accéléré dépasse celle relevée in situ (carbonatation naturelle) uniquement pour deux bétons : M25CV et M25. Pour les autres types de bétons, les valeurs obtenues en laboratoire sont soit identiques (M25EA et M50EA), soit inférieures (M25CVEA, M30CV, M50CVEA, M50CV, M50, M75FSEA et M75EA) à celles mesurées sur site, aux périodes analysées. Cet effet se manifeste de manière encore plus prononcée lorsque l'on examine les résultats du côté des talus, où les profondeurs carbonatées sont systématiquement supérieures, par rapport à ceux du côté de la chaussée. Ces observations soulignent une fois de plus l'importance de l'état hydrique du matériau ainsi que celle de la microstructure, notamment la structure poreuse, de la couche superficielle dans le processus de carbonatation.

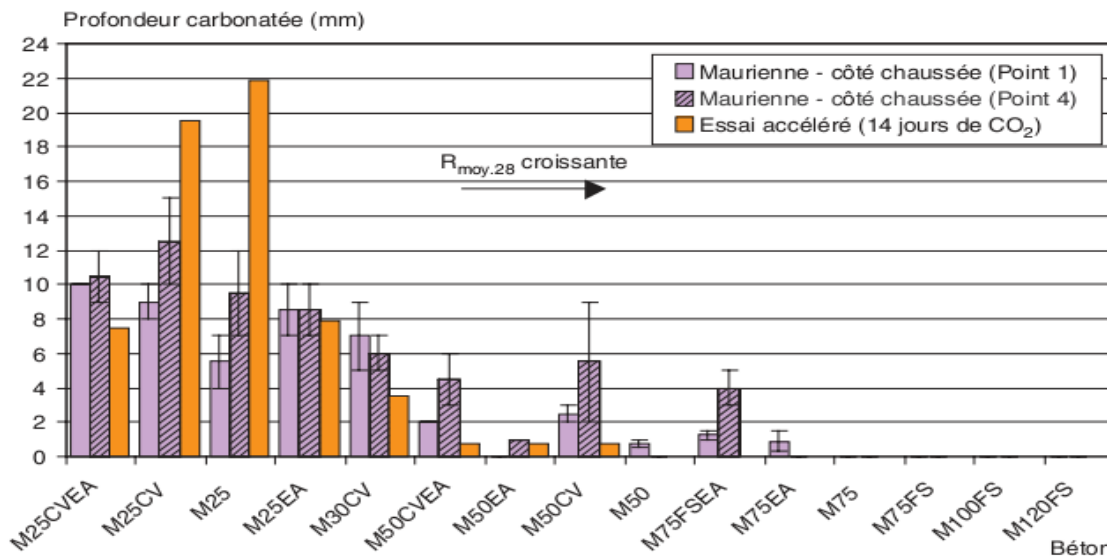
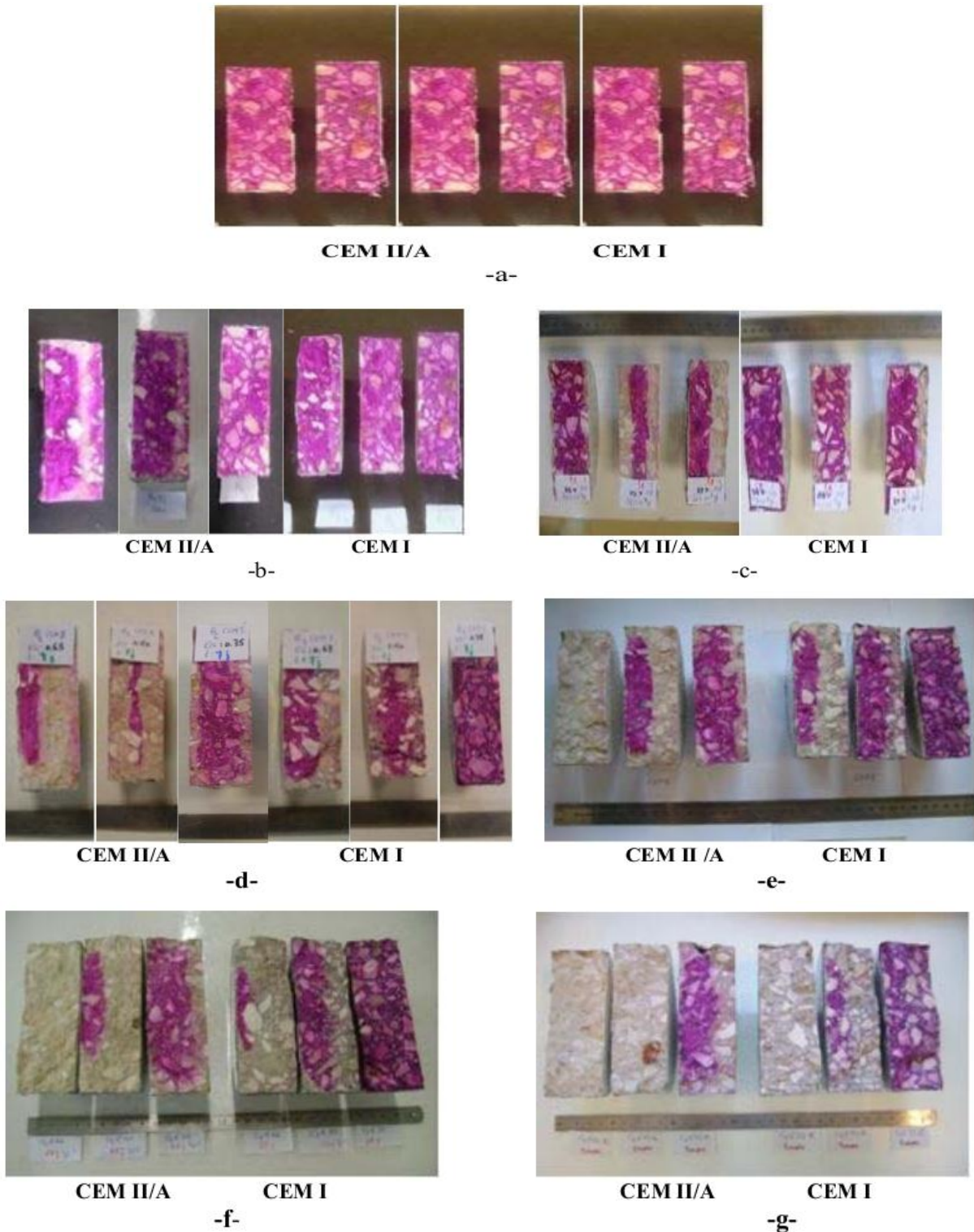


Figure I.56: Comparaison des profondeurs carbonatées mesurées sur les carottes issues des corps d'épreuve du site de Maurienne et sur éprouvettes prismatiques 70×70×280 mm après 28 jours de cure humide et essai accéléré en laboratoire à 14 jours d'exposition au CO₂ 50±5 %) **Véronique BAROGHEL-BOUNY et al [55]**,

Fatima-Zohra DAKHMOUCHE CHABIL [62], Il a été observé que les bétons composés de CEM II/A présentent un taux de carbonatation supérieur à celui des bétons à base de CEM I, et ce, pour toutes les périodes d'évaluation. La **figure I.57** illustre également que le front de carbonatation s'accroît en fonction du rapport E/C et du temps d'exposition au CO₂.



a: t0 - b: 1 j - c: 3 j - d: 7 j - e: 14 j - f: 28 j - g: 3 mois

Classement des bétons de gauche à droite disposition des bétons de gauche à droite. CEM II/A $e/c=0.67$, CEM II/A $e/c=0.50$, CEM II/A $e/c=0.35$, CEM I $e/c=0.63$, CEM I $e/c=0.50$, CEM I $e/c=0.35$.

Figure I.57: Aspect des éprouvettes après la pulvérisation de phénolphtaléine **Fatima-Zohra DAKHMOUCHE CHABIL [62].**

La vitesse d'avancement de la carbonatation est d'autant plus significative lorsque le rapport E/C est élevé [62], [63]. En effet, c'est avec un rapport E/C de 0,67 que la cinétique de la carbonatation atteint son maximum, comme l'illustre la Figure I.58.

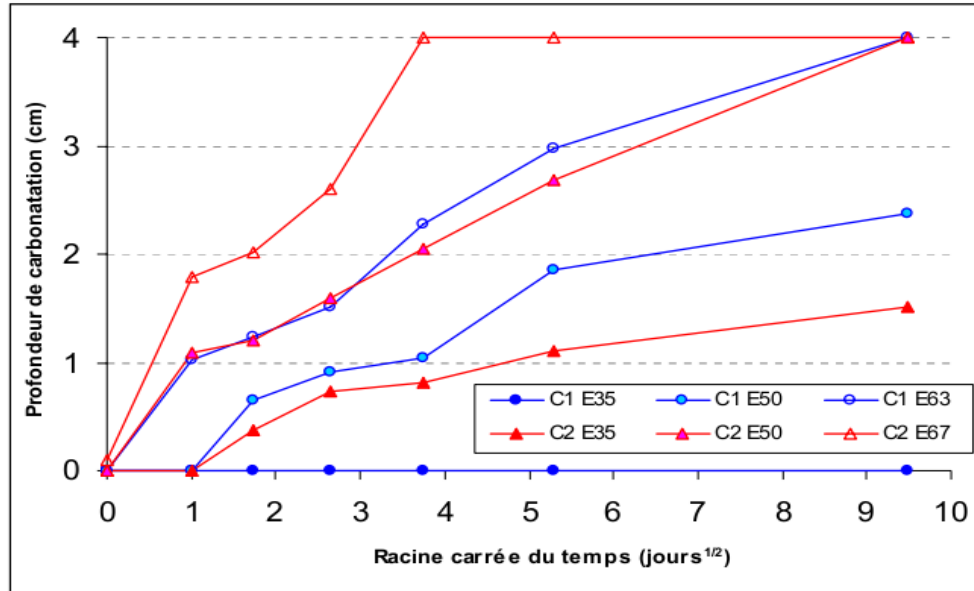


Figure I.58: Évaluation de la profondeur de carbonatation par l'application de phénolphthaléine [62].

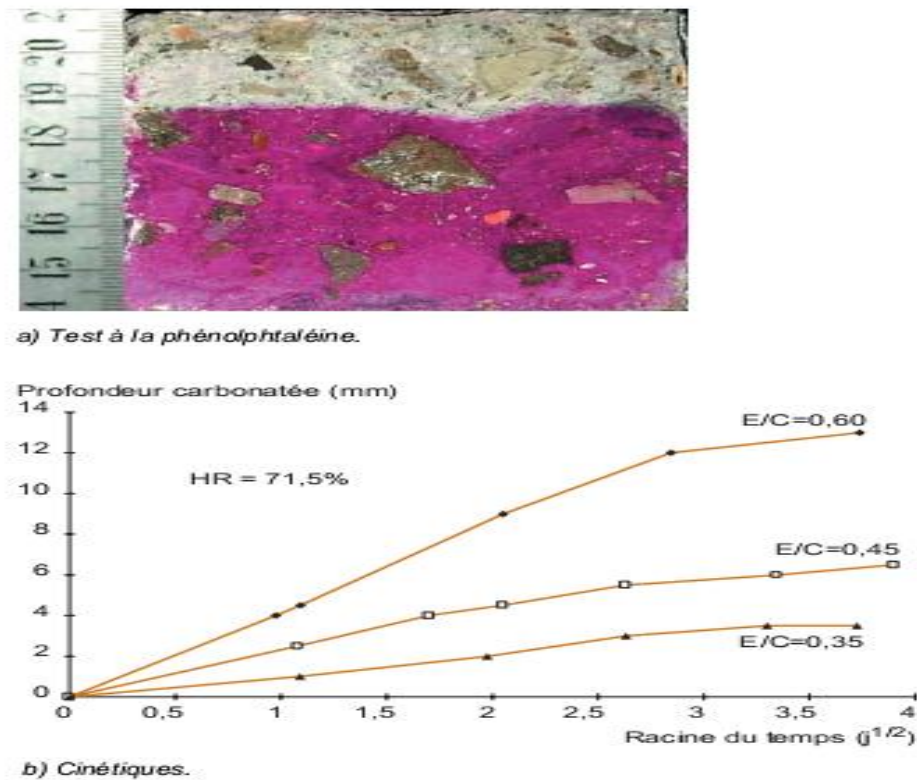


Figure I.59: Cinétiques de carbonatation (essai accéléré à HR = 71,5 % et à [CO₂] = 50 %) des pâtes de ciment présentant divers rapports E/C, toutes élaborées à partir du même ciment CEM I, ont été évaluées par pulvérisation de phénolphthaléine à différentes périodes [63].

I.7. Synthèse de chapitre :

Un béton à haute performance a été caractérisé par une fluidité à l'état frais et une microstructure très dense comparativement au béton classique, ce béton offre une résistance supérieure à la compression et à la traction $RC_{28j} \geq 60\text{MPa}$, tout en ayant un rapport E/C de 0,4. Diverses approches pour la formulation des BHP existent à l'échelle mondiale, notamment la méthode américaine, celle de **Mehta et Aitcin**, ainsi que la méthode développée par l'université de **Sherbrooke**.

Résistance aux agressions acides

Le béton peut être exposé à un large éventail d'attaques causées par des acides organiques et inorganiques. Les milieux acides peuvent provenir de l'agriculture, urbaine et industrielle activités humaines, ainsi que survenant naturellement. La problématique de l'attaque par les acides prend une ampleur croissante, en raison de l'augmentation des dégradations des structures en béton à travers le monde. Cette situation regrettable est le résultat de l'accroissement des sources d'acidité, provoqué par l'intensification des activités urbaines et industrielles, ainsi que de la sensibilité élevée des matériaux cimentaires dans des environnements acides, en raison de leur alcalinité prononcée.

La recherche sur la résistance des matériaux cimentaires aux attaques acides a été menée par de nombreux chercheurs à l'échelle mondiale. Ces études comportent les mécanismes d'attaques par les acides avec de PH de solution inférieur, égal ou supérieur à 4. Certains auteurs ont étudiés l'effet des attaques par les acides forts tel que l'acide sulfurique, chlorhydrique, carbonique et phosphorique sur les différents matériaux cimentaires mortier et béton avec sans ajouts minérales. Autres chercheurs ont été basés dans ces études sur l'effet néfaste des acides organiques, ces études comportent l'effet unique ou un mélange des deux ou plusieurs types d'acides organiques. Les résultats indiquent qu'une diminution du rapport E/C accroît la résistance aux attaques acides. L'ajout de substituants tels que la fumée de silice, le métakaolin et la cendre volante renforce cette résistance de manière plus efficace que les mélanges binaires contenant uniquement de la fumée de silice. La nature de l'acide joue un rôle crucial dans l'attaque acide. Lors d'une attaque par l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique, le sel de calcium formé se dissout dans l'eau, entraînant ainsi une perte de masse plus significative. En cas d'attaque d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique, le sel de calcium formé est soluble dans l'eau, ce qui entraîne une perte de masse plus élevée. Tandis, dans le cas d'une attaque à l'acide sulfurique, le sel de calcium formé n'est pas soluble dans l'eau.

Durabilité aux attaques des sulfates

L'attaque d'un matériau cimentaire par les sulfates peut être définie par la détérioration qui résulte par l'interaction physico-chimique entre les produits de l'hydratation du ciment et les sulfates. Il existe deux types de sources de sulfates : internes et externes. Les principales sources externes de sulfates proviennent de l'eau de mer et des eaux souterraines. Parmi les sulfates fréquemment rencontrés dans les sols et les eaux souterraines, on trouve les sulfates de sodium, de potassium, de calcium et de magnésium. Les sources internes de sulfates peuvent inclure ceux présents dans les ciments utilisés pour la fabrication du béton, ainsi que l'utilisation de granulats et d'eau de gâchage contenant des sulfates.

Plusieurs chercheurs ont examiné les mécanismes par lesquels les sulfates attaquent les matériaux cimentaires. :

L'effet des substituants minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires face aux sulfates a été l'objet d'études par divers chercheurs. Notamment, la fumée de silice a été analysée, et certaines études ont montré qu'elle peut améliorer la résistance aux sulfates de potassium et de magnésium. À l'inverse, d'autres travaux ont mis en évidence l'absence d'amélioration significative de cette résistance par le biais de la substitution de fumée de silice.

L'influence des températures élevées et basses sur la résistance des matériaux cimentaires aux sulfates a été abordée par divers chercheurs, qui ont constaté une baisse de cette résistance à 60 °C et à 5 °C.

Le gypse et l'ététringite sont des composés souvent identifiés suite à une attaque par sulfates à température ambiante, tandis que la thaumasite se forme à des températures plus basses.

Perméabilité aux gaz :

La perméabilité K constitue un indicateur essentiel pour analyser la résistance d'un béton face à l'infiltration d'agents agressifs. Les valeurs de perméabilité K varient en fonction du degré de saturation S_r du matériau cimentaire. Des recherches ont démontré que la perméabilité au gaz K d'un béton haute performance (BHP) est inférieure à celle d'un béton classique, et que les valeurs de K diminuent avec l'augmentation du degré de saturation S_r .

Carbonatation du béton:

La présence de dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2) entraîne la carbonatation du béton, qui est l'une des causes majeures de la corrosion des armatures dans les constructions en

béton. La conséquence principale de ce phénomène est la réduction du pH, due à la dissolution de la Portlandite dans la solution interstitielle. Cette diminution du pH altère la couche passivante, provoquant la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le pH atteint environ 9 à la profondeur de leur enrobage. La carbonatation de la Portlandite et celle des silicates de calcium hydratés se produisent en même temps, mais la carbonatation de la Portlandite est plus rapide. Par ailleurs, la vitesse de progression du front de carbonatation est d'autant plus élevée que le rapport E/C est important.

II.1 INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales et protocoles employés pour la caractérisation des matériaux utilisés ainsi que pour l'évaluation de la durabilité des BHP formulés.

La présentation des procédés d'analyse en laboratoire est résumée comme suit : méthodes de caractérisation des matériaux constituant le béton (sable, gravier, ciment et adjuvant). Par la suite nous présenterons les méthodes de caractérisation physico-mécaniques du béton dans son état frais et durci, les techniques d'évaluation de la durabilité du béton ainsi que la présentation des protocoles simulés pour mesurer la durabilité aux attaques par les acides et les sulfates.

II.2. TESTS RÉALISÉS SUR LES GRANULATS :

II.2.1. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE AU MOYEN DE TAMISAGE :

L'essai de granulométrie a pour objectif de quantifier le pourcentage en poids des différentes particules des grains constituant l'échantillon (sable ou gravier).

L'essai est réalisé conformément à la norme européenne **BS : EN 12620+A1**.

II.2.2. ANALYSE granulométrique fondée sur la méthode de sédimentation :

La sédimentométrie permet de réaliser une analyse granulométrique sur des échantillons de sable ayant un diamètre inférieur à 100 micromètres.

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer le pourcentage en poids des particules fines et de les représenter graphiquement la courbe granulométrique des fines jusqu'à un diamètre d'environ 2 micromètres.

L'essai est effectué conformément à la norme **NF. P94-093**

II.2.3. EQUIVALENT DE SABLE

L'essai d'équivalence de sable est effectué conformément à la norme **NF.P18-598**, qui est équivalente à la norme **NA455**. Cet essai vise à évaluer la propreté du sable.

II.2.4. TEST AU BLEU DE METHYLENE :

Le test au bleu de méthylène permet d'évaluer l'activité de la fraction argileuse dans le sable. L'essai est réalisé conformement à la norme **NF. P94-068** équivalente à **NA 1948**.

La valeur du bleu est donnée par l'expression suivante:

$$V_B = \frac{B}{m} \cdot 100 \dots \dots \dots II.1$$

B : masse du bleu de méthylène introduit en gramme.

m :masse de l'échantillon de sable en grammes.

II.2.5. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.

La masse volumique apparente est déterminée par :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots II.2$$

M : masse de l'échantillon (sable ou gravier) exprimée en grammes.

V : Volume apparent de l'échantillon sec, en prenant en compte les vides présents dans ou entre les grains.

II.2.6. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

La masse volumique absolue d'un sable ou d'un gravier est établie par la méthode des déplacements de liquide. La masse volumique est calculée comme suit :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots II.3$$

M : Masse de l'échantillon (300 grammes).

V₁ : Volume d'eau dans l'éprouvette avant introduction de la masse.

V₂ : volume d'eau présente dans l'éprouvette après l'incorporation de l'échantillon.

II.2.7. ABSORPTION DES GRANULATS

Selon la norme NF P 18-554, équivalente aux normes NA 451 et 18-555, l'absorption des granulats est mesurée. Cette absorption est définie comme le rapport entre l'augmentation de la masse de l'échantillon après avoir été imbibé d'eau et sa masse sèche. La relation qui permet de déterminer l'absorption des granulats est la suivante :

$$Abs = \frac{M_a - M_s}{M_s} . 100 \dots\dots\dots II.4$$

Ma : correspond à la masse de l'échantillon après 24 heures d'imbibition

Ms : est la masse de l'échantillon lorsqu'il est sec.

II.2.8.ESSAI LOS ANGELES

La résistance au choc d'un gravier est déterminée par un essai appelé **Los Angeles** suivant la norme **NF 18 -573** équivalente à **NA 458**. Cette résistance au choc est exprimée par un coefficient L_A donné par la formule suivante:

$$L_A = \frac{m}{M} \cdot 100 \dots \dots \dots II.5$$

M : représente la masse de l'échantillon soumis à l'essai, qui est de 5000 g

m : désigne la masse des particules de taille inférieure à 1,6 mm résultant de la fragmentation de l'échantillon testé, lesquelles sont soumises aux impacts des boulets normalisés dans le cylindre de la machine de Los Angeles pendant 500 rotations.

II.3. ESSAIS REALISES SUR LE CIMENT

II.3.1.FINESSE DU CIMENT

La finesse du ciment est caractérisée par sa surface spécifique qui est définie par la superficie globale des particules de ciment présentes dans une unité de masse de poudre.

La détermination de la finesse s'effectue à l'aide d'un dispositif connu sous le nom de **perméabilimètre de Blaine** dont les différentes étapes d'essai sont définies dans la norme **EN 196-6** équivalente à la norme algérienne **NA 231**. La surface spécifique d'un ciment est donnée par la relation suivante.

$$SP = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{1-P} \cdot \frac{1}{\sqrt{0.1\eta}} \dots \dots \dots II.6$$

K : Constant de l'appareil.

η : Viscosité de l'air à une température de l'essai.

P : Porosité qui est définie par :

$$P = \frac{V - V_c}{V} \dots \dots \dots II.7$$

V : Volume de la cellule.

V_c : Volume absolu de ciment consolidé au sein de la cellule.

ρ_c : masse volumique absolue du ciment.

II.3.2. CONSISTANCE DE CIMENT :

Cet essai vise à déterminer le pourcentage d'eau nécessaire à la préparation d'une pâte de ciment ayant une consistance normale, caractérisée par sa fluidité. L'évaluation est effectuée à l'aide de l'appareil de Vicat, en accord avec la norme **EN 196-3** équivalente à la norme algérienne **NA 229**.

II.3.3. TEMPS DE PRISE

Il convient d'évaluer le temps de prise de la pâte de ciment durant les premières heures de son durcissement.

Ce temps de prise est influencé par divers facteurs, notamment la finesse du ciment et sa composition chimique, la température ambiante et l'utilisation d'un adjuvant.

L'essai est conduit avec l'appareil de Vicat, doté d'une aiguille ayant un diamètre de 1,13 mm. La norme **EN 196-3** fournit une description des détails concernant l'essai.

II.3.4. DETERMINATION DE LA STABILITE:

La stabilité est examinée à travers un essai réalisé avec un appareil appelé **Le Chatelier**. Ce test a pour but de déterminer l'augmentation du volume de la pâte de ciment au cours de la réaction d'hydratation. La stabilité est exprimée par la valeur suivante :

$$\text{Stabilité} = C - A \dots \dots \dots \text{II.8}$$

A: distance entre les points des aiguilles après 24 h de conservation à une température $T=20^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR=98\%$.

B: distance entre les points des aiguilles après 3 h dans un bain d'eau maintenu à ébullition.

C: distance entre les points après refroidissement jusqu'à 20°C .

Les détails d'essai sont décrits par la norme **EN 196-3** équivalente à la norme algérienne **NA 232**.

II.4. ESSAIS REALISES SUR L'ADJUVANT

II.4.1 EXTRAIT SEC

L'extrait sec d'un adjuvant est déterminé par un simple essai conformément à la norme **EN 480-8**.

Le pourcentage d'extrait sec d'un adjuvant est donné par la relation suivante:

$$S(\%) = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100 \dots\dots\dots II.9$$

S : Extrait sec de l'adjuvant (%).

m1 : Masse de l'adjuvant liquide (m1=10g).

m2 : Masse de l'adjuvant après le séchage à l'étuve pendant 4h à une température 105°C.

II.4.2 METHODE DES COULIS [02], [03].

L'objectif principal de la méthode des coulis consiste à déterminer expérimentalement le dosage optimal en super-plastifiant (dose de saturation). Comme règle générale, l'essai est réalisé avec un rapport E/C qui varie entre 0.3 à 0.4. Pour la composition de coulis, en utilisant uniquement le superplastifiant ciment, eau et en utilisant des pourcentages variés, la technique adoptée pour déterminer la dose de saturation repose sur la méthode du cône de MARSH. L'essai consiste à préparer un volume déterminé de coulis et à en mesurer le temps d'écoulement, comme le montre la figure II.1.a.

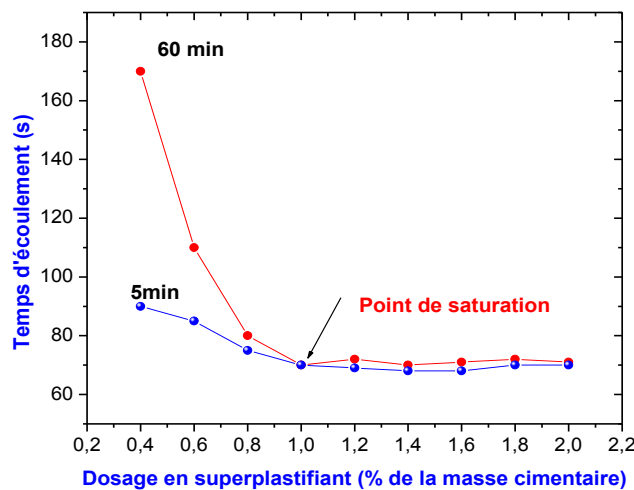


Figure II. 1: Détermination de la dose de saturation.

II.5. ESSAIS REALISES SUR LE BETON

II.5.1. CONSISTANCE DU BETON

La consistance du béton est mesurée par un essai d'affaissement au cône d'Abrams, souvent appelé "Slump test". Cet essai est effectué en conformité avec la norme NF P 18-45 équivalente à la norme algérienne NA 432.

II.5.2. RESISTANCE MECANIQUE

II.5.2.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION : La résistance à la compression est mesurée sur des échantillons cubiques de dimensions $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$, et la préparation de ces échantillons a été réalisée conformément à la norme **NF EN 12390-1**. Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'eau à une température $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours. L'écrasement des éprouvettes est réalisé sur une presse hydraulique. L'essai est effectué conformément aux exigences de la norme **NF EN 12390-3**.

Lors de la rupture, la force ainsi que la contrainte sont présentées sur l'écran de l'imprimante de la presse :

Où:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \dots\dots\dots II.11$$

σ_r : contrainte à la rupture en MPA.

A : section de l'éprouvette en mm^2 .

F_r : force appliquée à la rupture en N.

La presse utilisée est montrée sur la figure II.2.



Figure II.2 : La presse utilisée pour la compression.

II.5.3.2. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION : L'évaluation de la résistance à la traction par flexion se fait sur des échantillons prismatiques mesurant $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$, et leur confection a été effectuée selon la **NF EN 12390-1**. Le dispositif d'essai est montré sur la figure II.3. L'essai est effectué conformément à la norme **NF EN 12390-5**.

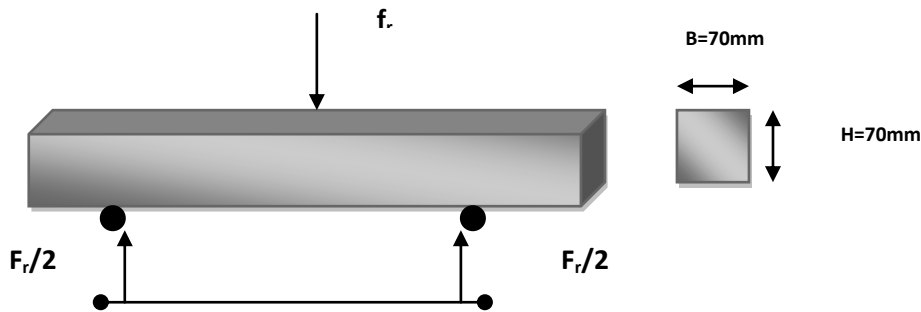


Figure II.3 : dispositif d'essai de flexion.

La contrainte de traction est donnée par :

$$\sigma_{rf} = \frac{1.5 \cdot f_r \cdot L}{b^3} \dots\dots\dots II.12$$

f_r : force de la rupture en flexion (N).

II.5.4 ESSAI DE L'AUSCULTATION DYNAMIQUE (ESSAI NON DESTRUCTIF)

L'essai est réalisé conformément à la norme **P 18 –418**. L'appareil utilisé est appelé **Ultrason** (voir **figure II.4**). La méthode consiste à mesurer le temps nécessaire à une impulsion dynamique pour traverser le volume du béton (éprouvette).

- **MODE OPERATOIRE :**

1. Placer l'émetteur et le récepteur sur les deux extrémités de l'échantillon
2. Observer la valeur temporelle de la première impulsion des ondes longitudinales générées par le transducteur entre deux points déterminés dans le béton.

- **VITESSE DE SON :**

$$V = \frac{L}{t} \dots\dots\dots II.13$$

1. V : vitesse du son exprimée en m/s.
2. L : distance entre les deux capteurs exprimée en m.
3. t : temps mesuré exprimé en μs .



Figure II.4: Appareil à ultrason.

II.5.5. ESSAI REALISE POUR LA DETERMINATION DE LA DURABILITE DU BETON

II.5.5.1 Perméabilité au gaz de béton durci [49][16]:

1. Principe de l'essai :

L'essai est basé sur le fait de soumettre l'échantillon en béton à un gradient de pression de gaz constant (N_2 , O_2 , air) pour notre essai, nous avons utilisés azote N_2 . La perméabilité apparente K , en m^2 , est établie à partir de la mesure du débit de gaz Q (m^3/s) qui sort de l'éprouvette sous un régime d'écoulement supposé permanent laminaire à faible nombre de Reynolds.

2. Appareillage :

Le dispositif de mesure de la perméabilité au gaz est composé par :

- a. Une cellule permettant de mesurer la perméabilité des échantillons de diamètre 150mm voir [figure II.5](#).
- b. Un dispositif montré dans la figure ...comprenant :
 - Une bouteille d'alimentation en gaz munie d'un détendeur.
 - Un régulateur (0.1 à 0.6 MPa) pouvant maintenir le niveau de pression avec une tolérance de ± 0.01 MPa
 - Un savon sous forme liquide.

- Utiliser de la résine ou des bandes adhésives en aluminium pour garantir l'étanchéité latérale de l'éprouvette.
- Des débitmètres à bulle de savon calibrés.
- Un chronomètre avec une précision de 0,1 seconde.
- D'azote, d'oxygène ou de l'air (quantité industrielle) suivant le gaz utilisé pour l'essai.

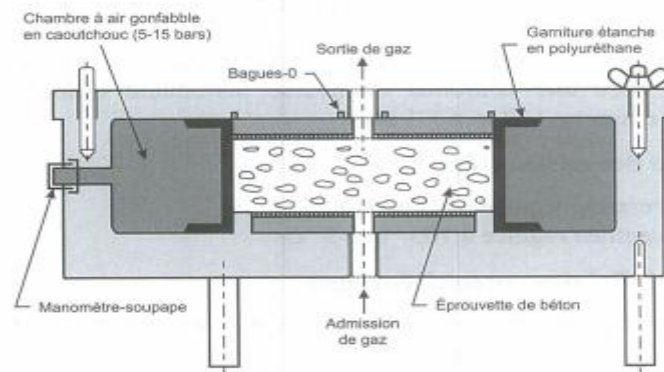


Figure II.5 : cellule de mesurer la perméabilité au gaz.

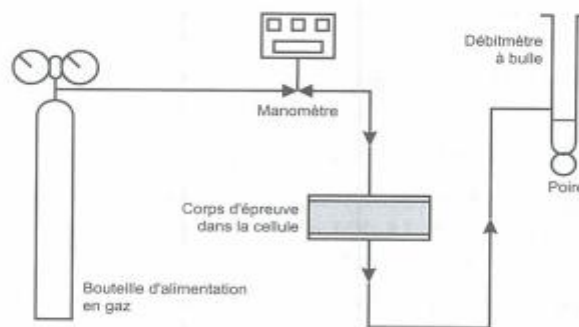


Figure II.6: schéma de principe pour le fonctionnement de perméamètre au gaz.

L'essai est effectué conformément à la norme **XP—P18-463 [49]** ; l'éprouvette cylindrique de diamètre $\phi=150\text{mm}$ et une épaisseur $L=50\text{mm}$.

Le dispositif de mesure est schématisé dans la **figure II.6 et II.7** suivante :



Figure II.7 : appareil de mesure de la perméabilité des gaz employé à l'université de Laghouat.

Equations :

L'évaluation de la perméabilité aux gaz repose sur l'équation (1) :

$$K = \frac{2 \cdot P_0 \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{A \cdot (P_a^2 - P_0^2)} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{V}{t_{moy}}$$

Notations :

P_0 : pression absolue atmosphère, exprimée en Pascals

P_a : pression absolue à l'entrée, exprimée en Pascals

P_1 : pression absolue à la sortie, exprimée en Pascals

Q : débit volumique, mesuré en m³/s

L : épaisseur de l'éprouvette, en mètres

A : section de l'éprouvette, en mètres carrés

μ : viscosité dynamique du gaz en Pa.s à $(20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$,

V : volume mesuré sur le débitmètre à bulle de savon, en m^3

t_{moy} : temps de parcours moyen, exprimé en secondes.

1- Taux de saturation S en % :

La perméabilité des bétons aux gaz est conditionnée par le niveau d'humidité dans l'éprouvette. En conséquence, cette perméabilité s'accroît avec le dessèchement du matériau, en opposition à la perméabilité à l'eau qui augmentera lors d'une saturation en eau.

À un instant donné, le taux de saturation en eau S d'une éprouvette est défini par l'équation suivante :

$$S(\%) = \frac{M - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}} \cdot 100$$

M_{sat} : masse de l'éprouvette saturée en kg

M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche en kg

M : masse de l'éprouvette à une échéance donnée en kg.

II.5.5.2 Test de carbonatation accélérée [16] :

- Concept de l'essai :

L'expérience vise à observer l'évolution de la profondeur du béton carbonaté dans un environnement saturé en dioxyde de carbone. Les moments de mesure de l'épaisseur du béton carbonaté sont fixés à 7 jours, 14 jours et 28 jours.

1. Appareillage : la détermination de la profondeur béton carbonaté nécessite l'appareillage suivant :
 - Etuve ventilée pouvant être contrôlée à $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
 - Installation expérimentale comportant une enceinte pouvant assurer une humidité relative de 65 % et équipé d'un système d'aimantation pour un gaz composé de 50 % de CO_2 et 50% de l'air.
 - Solution de phénolphthaléine en flacon pulvérisation dosée à 1/100 dans l'alcool.
 - Balance ayant une précision de 0,01 g.

2. **Profondeur de béton carbonaté** : La détermination de la profondeur de béton carbonaté s'effectue après avoir humidifié les surfaces et appliqué une solution de phénolphthaléine, laquelle permet de visualiser la séparation entre la zone saine et la zone carbonatée. Cinq distances sont déterminées pour chaque face : la distance plus faible, une distance la plus importante et la moyenne relatives de trois distances intermédiaires voir [figure II.8](#).

L'appareille de carbonatation utilisée au niveau de laboratoire de Laghouat est représentée dans la [figure II.09](#).

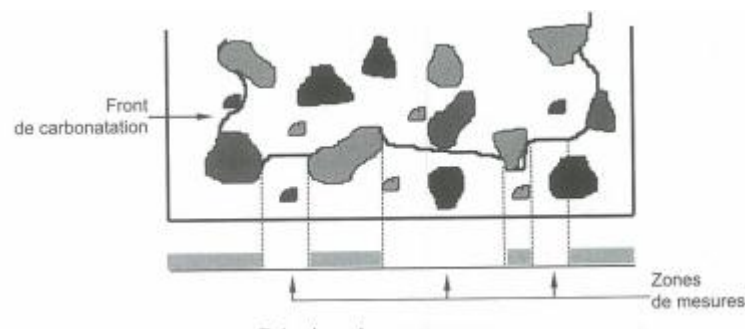


Figure II.8 : Profondeur de béton carbonaté.



Figure II.09 : L'appareille de carbonatation utilisée

II.5.6. Protocoles utilisés pour déterminer la durabilité des bétons aux attaques des acides et aux sulfates.

II.5.6.1 Attaques unique de l'acide sulfurique et l'acide acétique : l'essai de la résistance chimique vis à vis aux attaques par les acides a été réalisé sur deux modèles d'éprouvettes : des éprouvettes prismatiques de 7x7x28 cm et des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm. La concentration en acides des solutions était de 5%, les éprouvettes ont été immergées dans la solution dans des bacs en plastiques fermés durant 120 jours. Voir [figure II.10](#), ou la solution a été renouvelée chaque quinze jour pour l'attaque par l'acide sulfurique et renouvelée après une semaine pour l'attaque de BHP par l'acide acétique. Les échantillons ont placés dans une chambre climatique ou la température a été réglée à $20^{\circ}\text{C}\pm 1$. Les [figures II.11](#) et [II.12](#) montrent l'état des éprouvettes après un mois d'attaque par les acides sulfurique et acétique.



Figure II.10 : Conservation des éprouvettes dans des bacs en plastique.



Figure II.11 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par l'acide sulfurique avant nettoyage des éprouvettes



Figure II.12 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par l'acide acétique avant nettoyage des éprouvettes

II.5.6.2 Attaque par un mélange d'acides sous une température ambiante 20C°:

L'évaluation de la résistance chimique face aux agressions causées par un mélange d'acides a été réalisée sur deux types d'éprouvettes : des éprouvettes prismatiques mesurant 7x7x28 cm et des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm. Les solutions acides avaient une concentration de 5% de H_2SO_4 et 5% de CH_3COOH , et les éprouvettes en BHP ont été plongées dans cette solution dans des bacs en plastiques fermés durant 120 jours. Les échantillons ont placés dans une chambre climatique où la température a été réglée à 20C°. La solution a été renouvelée chaque quinze jour. La figure II.13 montre l'aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides avant nettoyage.



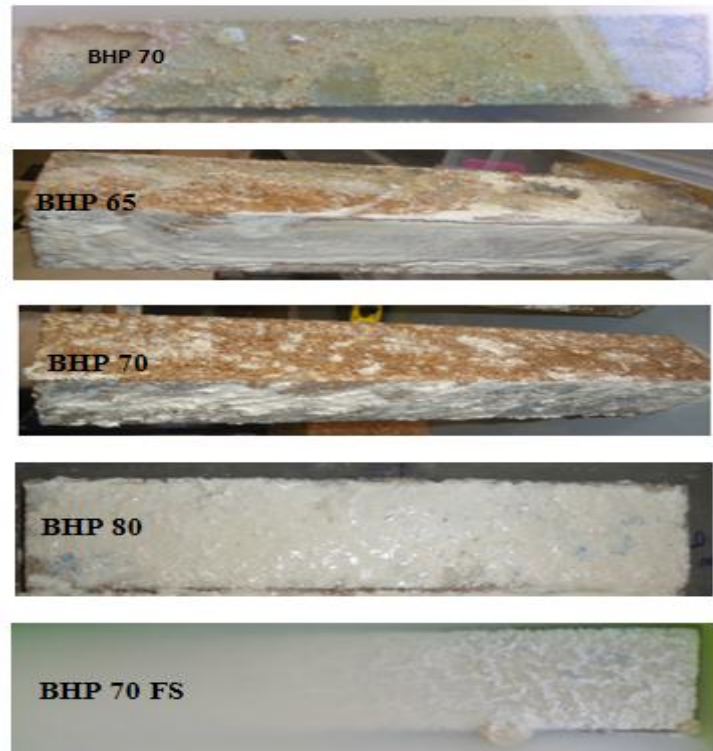


Figure II.13 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides avant nettoyage.

II.5.6.3 Attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel: l'essai de la résistance chimique vis à vis aux attaques par les acides a été réalisée sur deux types d'éprouvettes : des éprouvettes prismatiques mesurant 7x7x28 cm et des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm. La solution utilisée présentait une concentration de 5 % en H_2SO_4 et 5 % en CH_3COOH , et les éprouvettes en BHP ont été plongées dans cette solution dans des bacs en plastiques fermés durant 120 jours. Les échantillons ont placés dans une enceinte congélateur voir figure II.15, les éprouvettes ont été congelées dans la solution jusqu'à une température de $-18C^{\circ}\pm 1$ pendant quatre heures et puis dégelés. La solution a été renouvelée chaque quinze jour. Le nombre des cycles gel/dégel 03 cycle par jour et 360 cycles durant 120 jours conformément à la norme **P 18-424 [66]**. L'enceinte congélateur choisi pour effectue cet essai est présenté dans la figure II.14. La figure II.15 montre l'aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel avant nettoyage.



Figure II.14 : Enceinte congélateur utilisée pour effectuer l'essai.

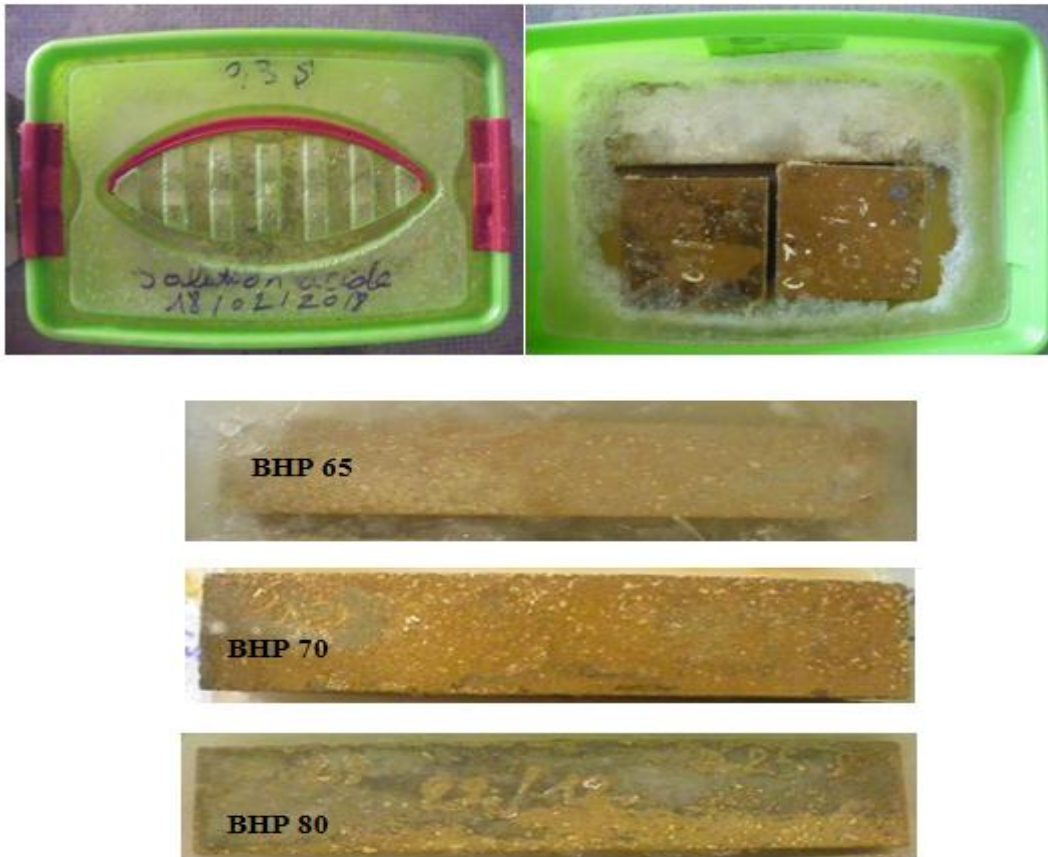


Figure II.15 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel avant nettoyage.

II.5.6.4 Attaques par un mélange d'acides sous une haute température de 50°C: l'essai de la résistance chimique vis à vis aux attaques par les acides a été effectué sur deux types des éprouvettes prismatiques de taille 7x7x28 cm ont été employées. La concentration des acides dans les solutions était de 5% de H_2SO_4 et de 5% de CH_3COOH , et les éprouvettes en BHP

ont été plongées dans la solution dans des bacs en plastiques fermés durant 120 jours. Les échantillons ont placés dans une étuve où la température a été réglée à 50C°. La solution a été renouvelée chaque quinze jour. L'étuve utilisé pour effectuer l'essai est montré dans la [figure II.16](#). La [figure II.17](#) montre l'aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides sous l'effet de température 50c° après avant nettoyage.



Figure II.16: étuve utilisé pour effectuer l'essai



Figure II.17 : Aspect des éprouvettes après un mois d'attaque par un mélange d'acides sous l'effet de température 50c° après avant nettoyage des éprouvettes.

II.5.6.5 Attaques par le sulfate de magnésium $MgSO_4$ sous une température ambiante 20C°: l'essai de la résistance chimique vis à vis aux attaques par les sulfates a été effectué sur deux catégories d'éprouvettes sont disponibles : des éprouvettes prismatiques de

dimensions 7x7x28 cm et des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm. La concentration en sulfate dans la solution était de 5% de MgSO_4 , les éprouvettes en BHP ont été immergées dans la solution dans des bacs en plastiques fermés durant 06 et 12 mois. Les échantillons ont placés dans une chambre climatique ou la température a été réglée à 20°C°. La solution a été renouvelée chaque trente jour. La figure II.18 montre l'état des éprouvettes après un mois d'attaque par une solution de MgSO_4 à 5 %.

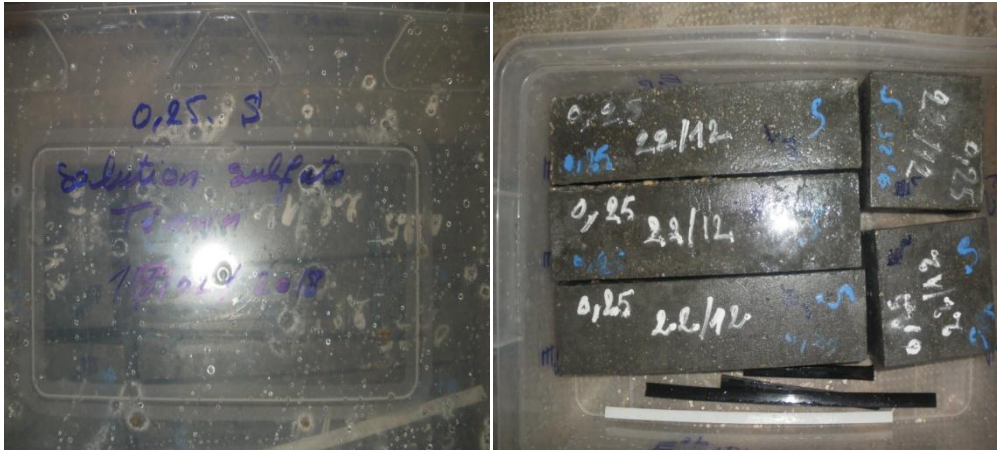


Figure II.18 : État des éprouvettes après un mois d'exposition à une solution de MgSO_4

II.5.6.6 Les attaques provoquées par le sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'influence des cycles de gel et de dégel: L'examen de la résistance chimique vis à vis aux attaques par les sulfates a été réalisée sur deux types d'éprouvettes : des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm et des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm. La solution contenait une concentration de 5 % de MgSO_4 en sulfates, les éprouvettes étant en BHP ont été immergées dans la solution dans des bacs en plastiques fermés durant 06 mois. Les échantillons ont placés dans une enceinte congélateur, les éprouvettes ont été congelés dans la solution jusqu'à une température de $-18\text{C}^\circ \pm 1$ pendant quatre heures et puis dégelés. La solution a été renouvelée chaque trente jour. Le nombre des cycles gel/dégel 03 cycle par jour et 360 cycles durant 180 jours. La figure II.19 présente l'état des éprouvettes après un mois d'attaque par une solution de 5% de MgSO_4 , soumises aux cycles de gel et de dégel.



Figure II.19: État des éprouvettes après un mois d'exposition à une solution de 5 % de MgSO_4 , soumis aux cycles de gel et de dégel.

II.5.6.7 Attaques par le sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'effet d'une haute température de 50°C : l'essai de la résistance chimique vis à vis aux attaques par les sulfates a été effectué sur deux types des éprouvettes prismatiques ayant des dimensions de $7 \times 7 \times 28$ cm, ont été employées. La concentration en sulfates dans la solution était de 5 % de MgSO_4 , les éprouvettes en BHP ont été immergées dans la solution dans des bacs en plastiques fermés durant 180 jours. Les échantillons ont placés dans une étuve ou la température a été réglée à 50°C . La solution a été renouvelée chaque trente jour.

II.7. Synthèse de chapitre :

Le deuxième chapitre traite de la présentation des différentes méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation des constituants essentiels, tels que le ciment, les sables, les graviers et les adjuvants, ainsi que des bétons employés. Ces essais ont été effectués conformément aux normes en vigueur. L'essai permettant l'étude de la durabilité du béton confectionné et les protocoles simulés proposés ont été présentés en fin de chapitre.

III.1 Introduction : Un BHP est identifié par sa structure extrêmement dense. L'utilisation d'un mélange granulaire sable plus gravier à compacité élevée est un paramètre essentiel afin de minimiser le volume des vides et d'assurer une structure dense de béton. L'originalité de cette recherche consiste à déterminer en laboratoire la compacité maximale des mélanges granulaires à l'état sec sans tamisage et par conséquent déduire les taux des différentes classes granulaires sable et graviers employés pour fabriquer un mètre cube de BHP. Les mélanges granulaires préparés en plusieurs combinaisons, notamment des mélanges binaires, ternaires, quaternaires et quintuples. Dans cette étude, les granulats sélectionnés sont des granulats calcaires concassés et un sable naturel extraits des carrières de la région de Laghouat. Six formulations de bétons à hautes performances sont ensuite créées, utilisant un mélange granulaire quintuple, avec et sans fumée de silice, afin d'analyser en laboratoire leurs caractéristiques physico-mécaniques.

Une étude comparative à la fin de cette étude est effectuée entre nos BHP et celles formulés dans le cadre du projet national français **BHP 2000**.

III.2 Formulation des BHP

La technique de formulation des BHP employée est simple, elle s'inspire de la méthode développée à l'université de Sherbrooke, qui adopte une approche comparable à celle de la norme américaine **ACI 211-1**. En général, notre formulation des BHP repose sur une combinaison de résultats empiriques, tels que la détermination en laboratoire de la compacité maximale des mélanges granulaires binaires, ternaires, quaternaires et quintuples, ainsi que sur le calcul des volumes absolus. L'objectif est de formuler un BHP dont sa résistance à la compression atteint 60MPa à l'âge de 28 jours de durcissement tout en limitant la teneur en fumée de silice ainsi d'assurer une maniabilité supérieure à 150mm afin de faciliter le coulage notamment dans les

Soit :

$$V_T = V_C + V_e + V_{G+S} + V_{F.S} + V_{SP} + V_{AIR} = 1000l$$

$$V_{G+S} = V_T - (V_C + V_e + V_{SP} + V_{F.S} + V_{AIR})$$

Où :

- V_T : volume total d'un mètre cube de béton ;
- V_C : volume de ciment pour d'un mètre cube de béton ;
- V_e : volume d'eau pour d'un mètre cube de béton ;
- V_{G+S} : volume de granulats (gravier+sable) pour d'un mètre cube de béton ;
- V_{SP} : volume de superplastifiant pour d'un mètre cube de béton ;

$V_{F.S}$: volume de le fumé de silice pour d'un mètre cube de béton ;

V_{air} : volume d'air pour d'un mètre cube de béton.

Les étapes à suivre pour la formulation des BHP sont illustrées dans ce que suit :

Première étape : le rapport E/L il a été varié entre 0.25 à 0.35 afin d'assurer une meilleure résistance à la compression ; pour les bétons avec et sans fumé de silice, la proportion de F.S a été limitée à 11 % du poids du ciment.

Deuxième étape : Évaluation du dosage de superplastifiant par la méthode des coulis.

Troisième étape : détermination de la teneur en granulats ou le dosage optimal des différentes classes granulaires utilisées a été basé sur la compacité maximale des mélanges à l'état sec. L'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 1097-3 dont cent 100 combinaisons ont été préparés avec la moyenne de trois mélanges. Nous commençons par les mélanges binaires puis ternaires, quaternaire et en fin les mélanges quintuples.

Quatrième étape : Gâché d'essai afin de vérifier la consistance des BHP.

Cinquième étape ; Ajustement de l'humidité.

Sixième étape : Vérifier la résistance mécanique après durcissement.

III.2.1 Matériaux et méthodes utilisées

III.2.1.1 Granulats : Pour notre étude expérimentale, nous avons sélectionné deux types de sables : sable calcaire concassés et un sable naturel issus de la carrière de l'oued M'zi, située dans la région de Laghouat.

Les différentes classes granulaires utilisées : un sable naturel roulé 0-4R et un sable et gravier calcaires concassés dont les classes granulaires utilisées sont : 0-4C, 4-8, 8-16 et 16-20. Les propriétés des granulats sont synthétisées dans le [tableau III.01](#).

Tableau III.01: Propriétés physiques des granulats.

PROPRIETES DES GRANULATS					
	0-4C	0-4R	4-8	8-16	16-20
Pourcentage des fines %	9.82	1.053	-	-	-
Masse volumique apparente g/cm³	1.55	1.59	1.48	1.35	1.36
Masse volumique absolue g/cm³	2.61	2.61	2.73	2.73	2.73
			52.19	51.94	49.87
Compacité C% : $C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \cdot 100$	59.29	61.08			
Porosité P% : $P = 1 - C$	40.71	38.92	47.81	48.81	50.13
Résistance au choc L_A					24
Equivalent du sable	Visuel ESV %	66.37	97	-	-
	A piston ESP %	69.96	98	-	-

Les courbes granulométriques des différente classes des granulats respectent les caractéristiques spécifiées par la norme européenne EN 12620:2002 voir tableau A.5 en annexe.

III.2.1.2 Ciment : Le ciment utilisé est un CEM II A 52.5 qui provient de la cimenterie Algérienne LAFARGE. L'analyse chimique est résumée dans le [tableau III.02](#). Les Caractéristiques du ciment CEM II A 52.5 sont résumées dans le [tableau III.3](#).

TABLEAU III.2 : Composition chimique de ciment CEM II A 52.5.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O-equ	Perte au feu	Teneur en MgO	Teneur en SO ₃	Chlorure (Cl)
19,58%	4,52%	2,76%	61,63%	0,61%	0,09%	0,50%	3,34%	1,75%	2,59%	0,019%

TABLEAU III.3 : Caractéristiques du ciment CEM II A 52.5.

Surface spécifique cm ² /g	Début de prise en	Fin de prise	Expansion	2 jours	28 jours
3747 cm ² /g	142min	235 min	1mm	29,4 MPA	60,80 MPA

III.2.1.3 Adjuvant : L'adjuvant employé dans la composition du béton est un superplastifiant MEDAFLOW 30 fabriqué par l'entreprise Algérienne GRANITEX. Les caractéristiques de superplastifiant sont résumées dans le [tableau III.04](#).

TABLEAU III.4 : Propriétés de super-plastifiant

Type de l'adjuvant : Super-plastifiant MEDAFLOW 40					
Densité d	Teneur en solide S (%)	PH	Forme	Couleur	Teneur en chlore g/l
1.07	30	7-8	liquide	Marron	<1

III.2.1.4 Fumé de silice : La fumé de silice utilisé est un MEDAPLAST HP fabriquée par l'entreprise Algérienne GRANITEX dont les caractéristiques physico-chimiques sont illustrées dans le [tableau III.05](#).

TABLEAU III.5 : Propriétés du fumé de silice

Composition chimique de fumé de silice			Caractéristiques physiques de fumé de silice	
SiO ₂	SO ₃	Cl-	Surface spécifique en m ² /g	Taille des particules en microns
> 85%	< 2.5%	< 0.2%	> 15	0.1

III.2.1.5 Eau de gâchage : Pour la préparation du béton, l'eau de gâchage employée est de l'eau potable provenant du robinet.

III.3 Résultats

III.3.1 Rapport eau/liant : Le rapport eau/liant ajusté pour donner la résistance spécifiée à 28 jours, il a été varié entre 0.25 à 0.35; pour les bétons avec et sans fumé de silice, la proportion de F.S a été limitée à 11 % du poids du ciment.

III.3.2 Dosage en superplastifiant: La méthode des coulis a été employée pour déterminer le dosage en superplastifiant. L'objectif principal de cette méthode est d'identifier expérimentalement la dose optimale de superplastifiant, connue sous le nom de dose de saturation. Comme règle générale, l'essai est réalisé avec un rapport E/C égal 0.35. Pour la composition de coulis, en utilisant uniquement le ciment, eau et le super-plastifiant avec des pourcentages variés. Les figures III.01 et III.02 présentent les doses de saturation des deux formulations, l'une sans fumée de silice et l'autre avec fumée de silice.

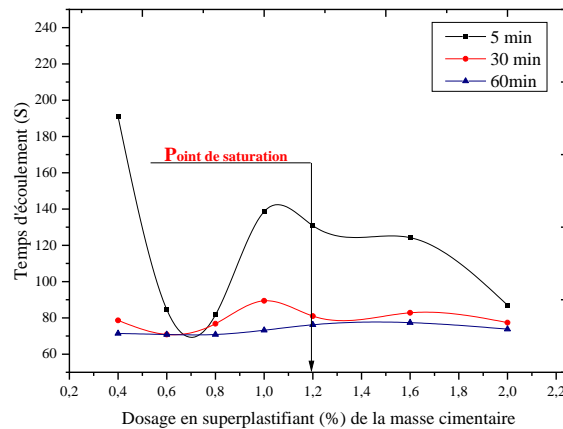


Figure III.1 : Dosage en superplastifiant compositions sans fumé de silice.

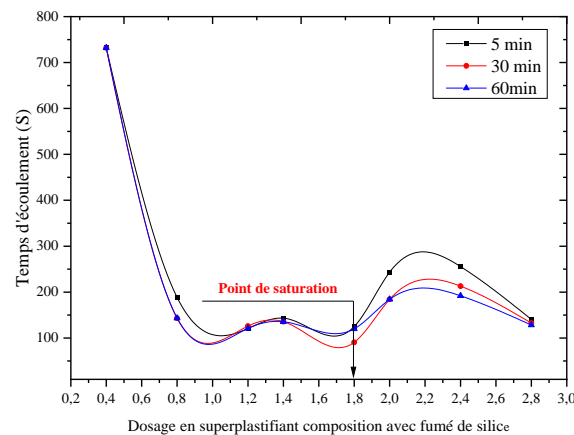


Figure III.2 : Dosage en superplastifiant compositions avec fumé de silice.

L'examen du système Liant-superplastifiant a démontré que la dose de saturation s'accroît en fonction de la substitution du fumé de silice.

III.3.3 Dosage optimale en granulats : La proportion optimale de chaque classe granulaire a été définie selon la mesure de la compacité maximale des mélanges granulaires lorsqu'ils sont secs. Cinq classes granulaires ont été choisies dont deux types des sables, un naturel 0-4R et l'autre calcaire concassé 0-4C, ainsi trois classes de granulats calcaires concassés : 4-8, 8-16 et 16-20. Les cinq classes granulaires ont été employées pour élaborer des combinaisons de mélanges granulaires de types binaires, ternaires, quaternaires et quintuples, dans le but d'évaluer la compacité maximale de ces mélanges.

III.3.3 .1 Evaluation de la compacité.

Simple versement : La norme NF EN 1097-3 décrit la méthode pour évaluer la compacité des mélanges secs. Cette méthode implique de remplir un récipient cylindrique d'un litre avec du sable ou du gravier, laissant le matériau s'écouler librement sous l'effet de la gravité, sans aucune contrainte. Après nivellement, on mesure la masse M du récipient. M_0 correspond à la masse du récipient vide, et ρ_{abs} est la masse volumique absolue. La masse globale pour chaque mesure égale à 2500 grammes, la compacité s'écrit :

$$C\% = \frac{\rho_{abs}}{\rho_{app}} \cdot 100\%$$

III.3.3 .2 Compacité élémentaire : Le tableau III.06 et l'histogramme de la figure III.03 regroupe les valeurs de la compacité élémentaire des différentes classe granulaire.

Tableau III.6 : Compacité élémentaires des différentes classes granulaires utilisées.

Classe granulaire	Compacité élémentaire (valeur moyenne de trois mesures)
Sable naturel 0-4R	0.6108
Sable calcaire concassé 0-4C	0.5929
Gravier calcaire concassé 4-8	0.5219
Gravier calcaire concassé 8-16	0.5194
Gravier calcaire concassé 16-20	0.4987

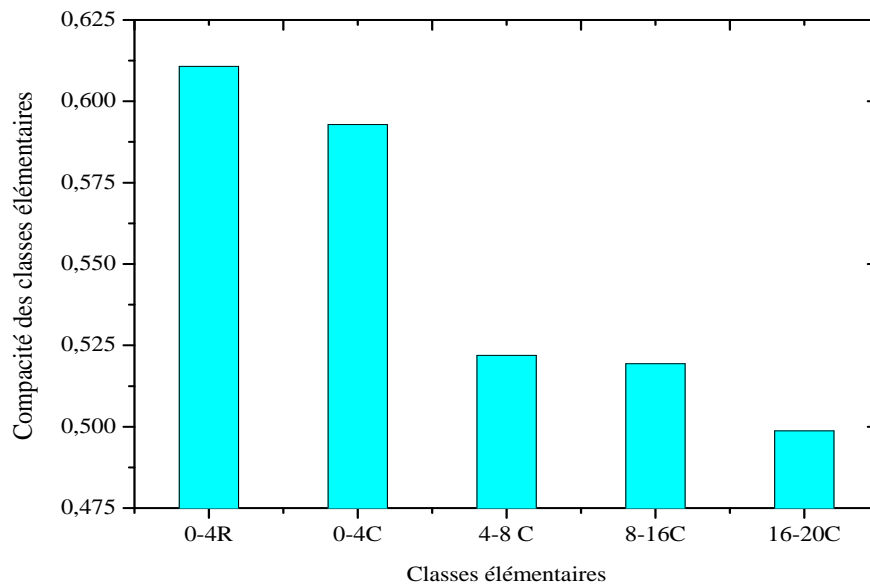


Figure III.3 : Compacité granulaires des différentes classes élémentaires.

III.3.3 .3 Compacité granulaire des mélanges binaires G_1+G_2 :

Quarante combinaisons ont été élaborées pour évaluer la compacité des mélanges granulaires binaires. L'essai se base sur l'ajout progressif des granulats G_1 par incrément de 10 %, avec une mesure de la compacité du mélange à chaque fois. La masse totale pour chaque combinaison est d'environ 2,5 kg. Les résultats figurent dans les [tableaux III.07 à III.10](#) et dans la [figure III.04](#). La valeur maximale de compacité a été enregistrée pour un mélange de 50 % de sable naturel et 50 % de sable calcaire, avec une valeur de 65,42%.

Tableau III.7: Compacité es mélanges binaires granulats concassés G_1 :4-8/ G_2 :8-16

%	G_1 :4-8/ G_2 :8-16				
	M_{G_1} : 4-8 en kg	M_{G_2} :8-16 en kg	ρ_{app}	ρ_{abs}	$C=\rho_{app}/\rho_{abs}$
0	0	2,5	1,35	2,73	0,4962
10	0,25	2,25	1,39	2,73	0,5097
20	0,5	2	1,43	2,73	0,5231
30	0,75	1,75	1,43	2,73	0,5231
40	1	1,5	1,45	2,73	0,5329
50	1,25	1,25	1,48	2,73	0,5414
60	1,5	1	1,50	2,73	0,5500
70	1,75	0,75	1,49	2,73	0,5463
80	2	0,5	1,45	2,73	0,5317
90	2,25	0,25	1,44	2,73	0,5280
100	2,5	0	1,42	2,73	0,5219
TOTAL	13,75	13,75			

Tableau III.8 : Compacité des mélanges binaires granulats concassés G_1 :4-8/ G_2 :16-20.

%	G_1 :4-8/ G_2 :16-20				
	M_{G_1} :4-8 en kg	M_{G_2} :16-20 en kg	ρ_{app}	ρ_{abs}	$C=\rho_{app}/\rho_{abs}$
0	0	2,5	1,36	2,73	0,4987
10	0,25	2,25	1,46	2,73	0,5353
20	0,5	2	1,51	2,73	0,5537
30	0,75	1,75	1,56	2,73	0,5720
40	1	1,5	1,52	2,73	0,5573
50	1,25	1,25	1,52	2,73	0,5573
60	1,5	1	1,53	2,73	0,5610
70	1,75	0,75	1,52	2,73	0,5573
80	2	0,5	1,49	2,73	0,5451
90	2,25	0,25	1,45	2,73	0,5317
100	2,5	0	1,42	2,73	0,5219
TOTAL	13,75	13,75			

Tableau III.9: Compacité des mélanges binaires granulats concassés G_1 :8-16/ G_2 :16-20

%	G₁:8-16/G₂:16-20				
	M _{G1} 8-16 en kg	M _{G2} 16-20 en kg	ρ _{app}	ρ _{abs}	C=ρ _{app} /ρ _{abs}
0	0	2,5	1,41	2,73	0,5170
10	0,25	2,25	1,41	2,73	0,5170
20	0,5	2	1,42	2,73	0,5207
30	0,75	1,75	1,45	2,73	0,5317
40	1	1,5	1,50	2,73	0,5500
50	1,25	1,25	1,48	2,73	0,5427
60	1,5	1	1,48	2,73	0,5427
70	1,75	0,75	1,47	2,73	0,5390
80	2	0,5	1,46	2,73	0,5353
90	2,25	0,25	1,45	2,73	0,5329
100	2,5	0	1,42	2,73	0,5194
TOTAL	13,75	13,75			

Tableau III.10 : Compacité des mélanges binaires granulats 0-4 roulés et concassés 0-4R/0-4C

%	G₁:0-4R/G₂:0-4C				
	M _{G1} :0-4 R en kg	M _{G2} :0-4 C en kg	ρ _{app}	ρ _{abs}	C=ρ _{app} /ρ _{abs}
0	0	2,5	1,55	2,61	0,5929
10	0,25	2,25	1,60	2,54	0,6293
20	0,5	2	1,62	2,56	0,6331
30	0,75	1,75	1,63	2,54	0,6424
40	1	1,5	1,65	2,53	0,6540
50	1,25	1,25	1,66	2,54	0,6542
60	1,5	1	1,67	2,61	0,6402
70	1,75	0,75	1,67	2,61	0,6402
80	2	0,5	1,65	2,61	0,6338
90	2,25	0,25	1,63	2,61	0,6236
100	2,5	0	1,59	2,61	0,6108
TOTAL	13,75	13,75			

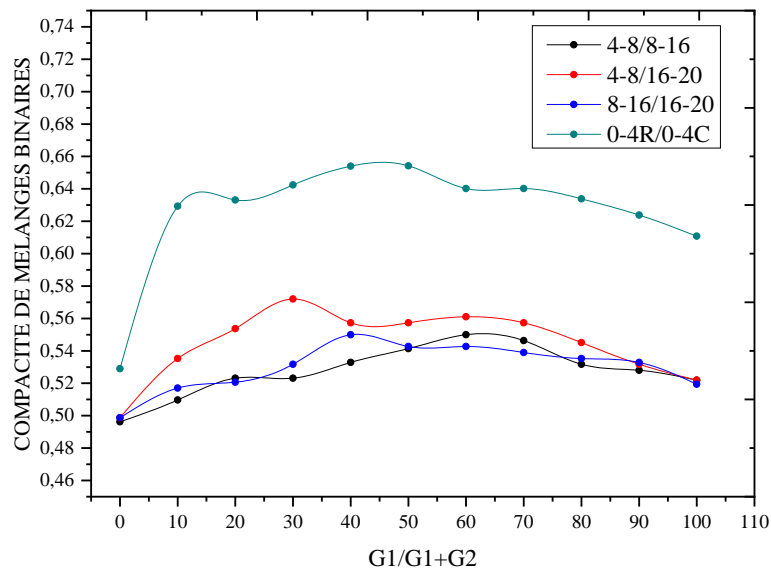


Figure III.4 : Compacité des mélanges binaires.

III.3.3 .4 Compacité granulaire des mélanges ternaires $G_1+(G_2+G_3)$:

Trente 30 combinaisons ont été préparées afin de mesurer la compacité des mélanges granulaires ternaire.

Les différentes combinaisons préparées sont comme suit :

$G_1+(G_2+G_3)=4-8/8-16/16-20$, $G_1+(G_2+G_3)=8-16/4-8/16-20$ et $G_1+(G_2+G_3)=16-20/8-16/4-8$.

L'essai repose sur l'introduction progressive des granulats G_1 par étapes de 10%. Les taux de (G_2+G_3) ont été calculés à partir des mélanges binaires qui maximisent la compacité. Par exemple, pour la combinaison $G_1+(G_2+G_3)=4-8/8-16/16-20$, G_2 représente 40% et G_3 60%. La compacité du mélange est ensuite mesurée en fonction de l'évolution de G_1 . Les résultats sont résumés dans les tableaux 11, 12, 13 et la figure III.05. La compacité maximale a été atteinte avec la combinaison $G_1+(G_2+G_3)=16-20/8-16/4-8$, où G_1 est à 40%, G_2 à 24% et G_3 à 36%.

Tableau III.11: Compacité des mélanges ternaire granulats concassés 4-8/8-16/16-20

%	$G_1:4-8/G_2:8-16/G_3:16-20$			ρ_{app}	ρ_{abs}	$C=\rho_{app}/\rho_{abs}$
	$G_1:M\ 4-8$ en kg	$MG_2: 8-16$ en kg	$MG_3:16-20$ en kg			

0	0	1	1,5	1,50	2,73	0,5500
10	0,25	0,9	1,35	1,48	2,73	0,5439
20	0,5	0,8	1,2	1,51	2,73	0,5537
30	0,75	0,7	1,05	1,54	2,73	0,5647
40	1	0,6	0,9	1,54	2,73	0,5647
50	1,25	0,5	0,75	1,58	2,73	0,5806
60	1,5	0,4	0,6	1,54	2,73	0,5647
70	1,75	0,3	0,45	1,53	2,73	0,5610
80	2	0,2	0,3	1,51	2,73	0,5549
90	2,25	0,1	0,15	1,43	2,73	0,5231
100	2,5	0	0	1,42	2,73	0,5207
TOTAL	13,75	5,5	8,25			

Tableau III.12: Compacité des mélanges ternaire granulats concassés 8-16/4-8/16-20

%	G₁ :8-16/G₂ :4-8/G₃ :16-20					
	M_{G1}: 8-16 en kg	M_{G2}: 4-8 en kg	M_{G3}: 16-20 en kg	ρ_{app}	ρ_{abs}	C=ρ_{app}/ρ_{abs}
0	0	0,75	1,75	1,56	2,73	0,5720
10	0,25	0,675	1,575	1,58	2,73	0,5793
20	0,5	0,6	1,4	1,59	2,73	0,5842
30	0,75	0,525	1,225	1,55	2,73	0,5671
40	1	0,45	1,05	1,57	2,73	0,5757
50	1,25	0,375	0,875	1,55	2,73	0,5683
60	1,5	0,3	0,7	1,54	2,73	0,5647
70	1,75	0,225	0,525	1,52	2,73	0,5573
80	2	0,15	0,35	1,47	2,73	0,5378
90	2,25	0,075	0,175	1,48	2,73	0,5427
100	2,5	0	0	1,42	2,73	0,5207
TOTAL	13,75	4,125	9,625			

Tableau III.13: Compacité des mélanges ternaire granulats concassés 16-20/8-16/4-8

%	G₁:16-20/G₂:8-16/G₃:4-8					
	M_{G1}: 16-20 en kg	M_{G2}: 8-16 en kg	M_{G3}: 4-8 en kg	ρ_{app}	ρ_{abs}	C=ρ_{app}/ρ_{abs}

0	0	1	1,5	1,50	2,73	0,5500
10	0,25	0,9	1,35	1,55	2,73	0,5696
20	0,5	0,8	1,2	1,64	2,73	0,6013
30	0,75	0,7	1,05	1,63	2,73	0,5989
40	1	0,6	0,9	1,67	2,73	0,6123
50	1,25	0,5	0,75	1,65	2,73	0,6050
60	1,5	0,4	0,6	1,65	2,73	0,6062
70	1,75	0,3	0,45	1,62	2,73	0,5952
80	2	0,2	0,3	1,54	2,73	0,5659
90	2,25	0,1	0,15	1,51	2,73	0,5524
100	2,5	0	0	1,36	2,73	0,4987
TOTAL	13,75	5,5	8,25			

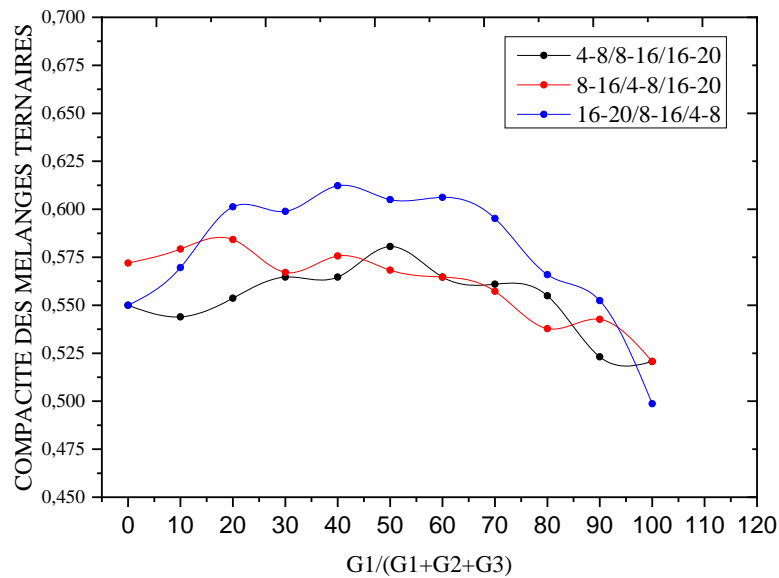


Figure III.5 : Compacité des mélanges ternaires.

III.3.3 .5 Compacité granulaire des mélanges quaternaire $G_1+(G_2+G_3+G_4)$:

vingt 20 combinaisons ont été préparées afin de mesurer la compacité des mélanges granulaires quaternaires.

Les différentes combinaisons préparées sont comme suit :

$$G_1+(G_2+G_3+G_4)= 0-4R/4-8/8-16/16-20, G_1+(G_2+G_3+G_4)= 0-4C/4-8/8-16/16-20$$

Les taux de $(G_2+G_3+G_4)$ ont été obtenus par la combinaison des mélanges ternaires, ce qui a permis d'atteindre la valeur maximale de compacité. Par exemple, pour la combinaison

$G_1+(G_2+G_3+G_4)= 16-20/8-16/4-8$, le taux de G_2 (16/20) est de 40%, G_3 (8/16) est de 24% et G_4 (4/8) est de 36%. Ensuite, la compacité du mélange a été évaluée en fonction de l'évolution de G_1 . Les résultats des mesures sont résumés dans les [tableaux III.14 et III.15](#) et la [figure III.06](#). La compacité maximale a été constatée pour la combinaison $G_1+(G_2+G_3+G_4)= 16-20/8-16/4-8$, avec des taux de G_1 égal à 40%, G_2 égal à 21,6%, G_3 égal à 14,4% et G_4 égal à 24%.

Tableau III.14: Compacité des mélanges quaternaires granulats concassés + roulés 0-4R/4-8/8-16/16-20

%	G ₁ :0-4R/G ₂ :4-8/G ₃ :8-16/G ₄ :16-20					ρ_{app}	ρ_{abs}	$C=\rho_{app}/\rho_{abs}$
	MG ₁ : 0-4R	MG ₂ : 4-8 x=36% MT	MG ₃ : 8-16 y=24% MT	MG ₄ : 16-20 z=40%	4-8/8-16/16-20 OPTM (36%+24%+40%)			
0	0	0,9	0,6	1,00	2,5(36%+24%+40%)	1,67	2,73	0,6123
10	0,25	0,81	0,54	0,90	2,25(36%+24%+40%)	1,70	2,73	0,6221
20	0,5	0,72	0,48	0,80	2(36%+24%+40%)	1,95	2,71	0,7194
30	0,75	0,63	0,42	0,70	1,75(36%+24%+40%)	2,02	2,73	0,7419
40	1	0,54	0,36	0,60	1,5(36%+24%+40%)	2,06	2,69	0,7632
50	1,25	0,45	0,3	0,50	1,25(36%+24%+40%)	2,04	2,73	0,7480
60	1,5	0,36	0,24	0,40	1(36%+24%+40%)	2,00	2,73	0,7321
70	1,75	0,27	0,18	0,30	0,75(36%+24%+40%)	1,90	2,73	0,6967
80	2	0,18	0,12	0,20	0,5(36%+24%+40%)	1,83	2,67	0,6838
90	2,25	0,09	0,06	0,10	0,25(36%+24%+40%)	1,73	2,69	0,6426
100	2,5	0	0	0,00	0	1,60	2,61	0,6133
TOTAL	13,75	4,95	3,3	5,5				

Tableau III.15: Compacité des mélanges quaternaires granulats concassés + roulés 0-4C/4-8/8-16/16-20

%	G ₁ :0-4C/G ₂ :4-8/G ₃ :8-16/G ₄ :16-20					ρ_{app}	ρ_{abs}	$C=\rho_{app}/\rho_{abs}$
	MG ₁ : 0-4C	MG ₂ : 4-8	MG ₃ : 8-16	MG ₄ : 16-20	4-8/8-16/16-20 OPTM (36%+24%+40%)			
0	0,000	0,900	0,600	1,000	2,5(36%+24%+40%)	1,67	2,73	0,6123
10	0,250	0,810	0,540	0,900	2,25(36%+24%+40%)	1,68	2,73	0,6148
20	0,500	0,720	0,480	0,800	2(36%+24%+40%)	1,77	2,73	0,6490

30	0,750	0,630	0,420	0,700	1,75(36%+24%+40%)	1,79	2,73	0,6551
40	1,000	0,540	0,360	0,600	1,5(36%+24%+40%)	1,88	2,57	0,7325
50	1,250	0,450	0,300	0,500	1,25(36%+24%+40%)	1,86	2,61	0,7117
60	1,500	0,360	0,240	0,400	1(36%+24%+40%)	1,88	2,69	0,6978
70	1,750	0,270	0,180	0,300	0,75(36%+24%+40%)	1,87	2,61	0,7168
80	2,000	0,180	0,120	0,200	0,5(36%+24%+40%)	1,83	2,73	0,6698
90	2,250	0,090	0,060	0,100	0,25(36%+24%+40%)	1,77	2,63	0,6727
100	2,500	0,000	0,000	0,000	0	1,60	2,61	0,6133
TOTAL	13,750	4,950	3,300	5,500				

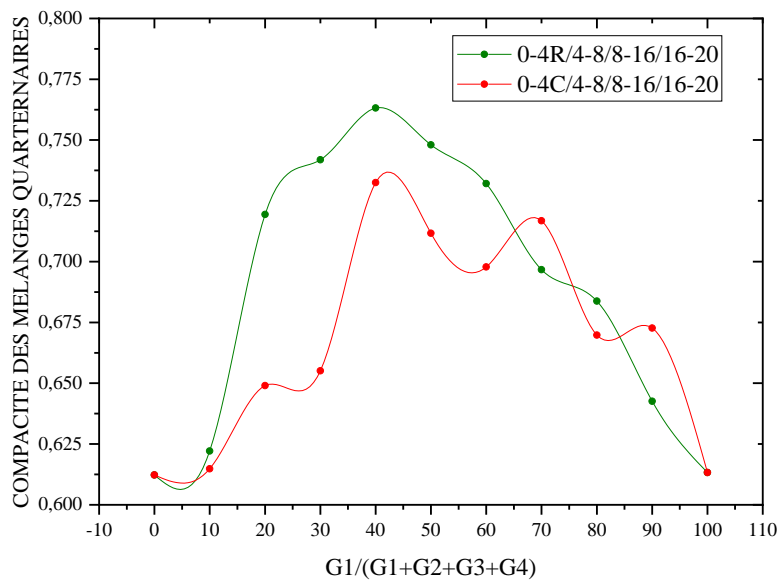


Figure III.6 : Compacité des mélanges quaternaires.

III.3.3 .6 Compacité granulaire des mélanges quintuples ($G_1 + G_2$) + ($G_3 + G_4 + G_5$):

Dix 10 combinaisons ont été préparées afin de mesurer la compacité des mélanges granulaires quintuples.

Les différentes combinaisons préparées sont comme suit :

$$(G_1 + G_2) + (G_3 + G_4 + G_5) = (0-4R + 0-4C) + (4-8/8-16/16-20)$$

Les taux de ($G_1 + G_2$) ont été déterminés à partir de la combinaison des mélanges binaires de granulats fins, ce qui a permis d'obtenir la valeur maximale de compacité. Les taux de ($G_3 + G_4 + G_5$) correspondant aux granulats de tailles 4-8, 8-16 et 16-20 ont été établis à partir d'un mélange ternaire, également en vue d'atteindre la compacité maximale. Ainsi, le taux de G_3 est de 36%, celui de G_4 est de 24% et celui de G_5 est de 40%. Par la suite, la compacité du mélange a été mesurée en tenant compte de l'évolution de ($G_1 + G_2$). Les résultats de ces mesures sont présentés dans le [tableau III.16](#) et la [figure III.07](#). La compacité maximale a été

observée pour la combinaison $(G_1+G_2)+(G_3+G_4+G_5) = (0-4R+0-4C)+(4-8/8-16/16-20)$, avec un taux de granulats fins (G_1+G_2) de 40% et un taux de gros granulats $(G_3+G_4+G_5)$ de 60%, répartis comme suit : $G_3=21.6\%$, $G_4=14.4\%$ et $G_5=24\%$. La compacité maximale atteinte est de 78.84%.

Tableau III.16: Compacité des mélanges quintuples (granulats concassés + roulés 0-4RC/4-8/8-16/16-20)

%	$G_1+G_2 : 0-4RC / G_3 : 4-8 / G_4 : 8-16 / G_5 : 16-20$							ρ_{app}	ρ_{abs}	$C = \rho_{app} / \rho_{abs}$
	$MG_1+G_2 : 0-4RC$	$MG_1 : 0-4R$	$MG_2 : 0-4C$	$MG_3 : 4-8$	$MG_4 : 8-16$	$MG_5 : 16-20$	4-8/8-16/16/20 OPTM 36%+24%+40%)			
0	0	-	-	0,900	0,600	1,000	2,5(36%+24%+40%)	1,67	2,73	0,6123
10	0,25(50%+50%)	0,125	0,125	0,810	0,540	0,900	2,25(36%+24%+40%)	1,70	2,73	0,6246
20	0,5(R%+C%)	0,250	0,250	0,720	0,480	0,800	2(36%+24%+40%)	1,83	2,69	0,6779
30	0,75(R%+C%)	0,375	0,375	0,630	0,420	0,700	1,75(36%+24%+40%)	1,94	2,65	0,7341
40	1(R%+C%)	0,500	0,500	0,540	0,360	0,600	1,5(36%+24%+40%)	2,06	2,61	0,7884
50	1,25(R%+C%)	0,563	0,563	0,450	0,300	0,500	1,25(36%+24%+40%)	2,09	2,73	0,7676
60	1,5(R%+C%)	0,750	0,750	0,360	0,240	0,400	1(36%+24%+40%)	2,08	2,73	0,7627
70	1,75(R%+C%)	0,875	0,875	0,270	0,180	0,300	0,75(36%+24%+40%)	2,06	2,73	0,7553
80	2(R%+C%)	1,000	1,000	0,180	0,120	0,200	0,5(36%+24%+40%)	2,02	2,69	0,7506
90	2,25(R%+C%)	1,125	1,125	0,090	0,060	0,100	0,25(36%+24%+40%)	1,93	2,73	0,7077
100	2,5(R%+C%)	1,250	1,250	-	-	-	0	1,66	2,54	0,6529
TOTAL		6,813	6,813	4,950	3,300	5,500				

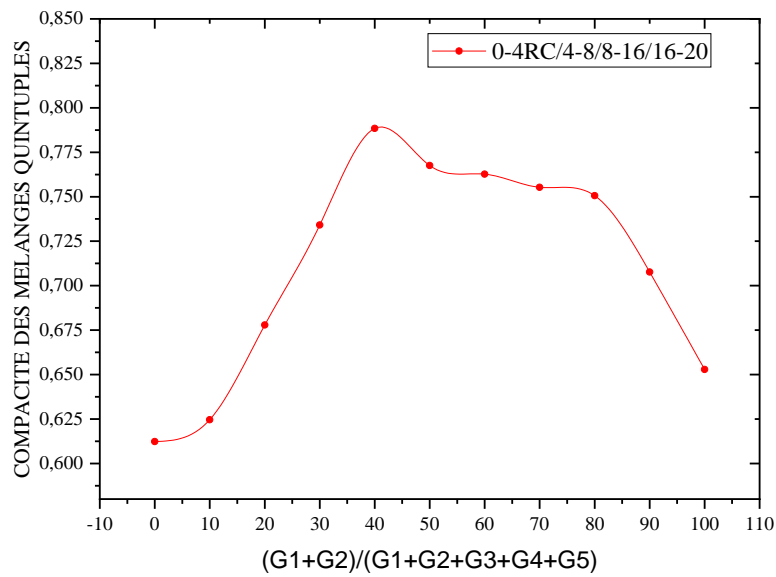


Figure III.7 : Compacité des mélanges quintuples.

Les compositions des différents bétons formulés et qui vont faire l'objet d'étude de caractérisation tant à l'état frais que durci sont présentés dans le [tableau III.17](#).

TABLEAU III.17: Formulations des BHP proposées.

Bétons	Gravier 16/20kg/m ³	Gravier 8/16 kg/m ³	Gravier 4/8 kg/m ³	Sable calcaire 0/4 kg/m ³	Sable alluvionnaire 0/4 kg/m ³	Ciment kg/m ³	F.S kg/m ³	Eau kg/m ³	SP Extraît sec kg/m ³	E/C	E/L	Affaissement en mm
BHP 80	424.01	254.41	381.61	337.81	337.81	570	0	142.	6.8	0.2	0.2	230
							0	5	4	5	5	
BHP 70	426.39	255.84	383.75	339.72	339.72	520	0	156	6.2	0.3	0.3	≈30
							0		4	0		0
BHP 65	432.05	259.23	388.84	344.22	344.22	470	0	164.	5.6	0.3	0.3	≈30
								5	4	5	5	0
BHP 85FS	416.93	250.16	375.23	332.17	332.17	513	5	142.	10.	0.2	0.2	230
							7	5	26	7	5	
BHP 75FS	419.93	251.96	377.94	334.56	334.56	468	5	156	9.3	0.3	0.3	≈30
							2		6	3	0	0
BHP 70FS	426.21	255.72	383.59	339.59	339.59	423	4	164.	8.4	0.3	0.3	≈30
							7	5	6	8	5	0

III.3.4 Résistance mécanique des BHP formulés :

Des éprouvettes cubiques de dimensions (10x10x10) cm³, ayant des âges de 3, 7, 28, 60, 120 et 360 jours, sont soumises à un essai de compression. En outre, des éprouvettes prismatiques

de (7x7x28) cm³, âgées de 28 et 60 jours, sont testées pour la flexion à trois points. L'évolution de la résistance mécanique à la compression et à la flexion est présentée dans le tableau III.18 ainsi que dans les figures III.08 et III.09.

TABLEAU III.18 : Résistance mécanique des formulations proposées.

Bétons	Résistance à la compression en MPa						Résistance à la flexion en MPa
Age	03j	07j	28j	60j	120j	1an	28j
BHP 80	64.59	69.42	84.26	89.8	97.5	102	5.25
BHP 70	58.29	62.87	72.51	80.89	87.8	92.1	5.01
BHP 65	50.02	52.54	68.9	75.5	77	84.2	4.66
BHP 85FS	67.41	80.25	86.71	95.48	99.63	116.93	5.22
BHP 75FS	64.86	69.78	75.62	89.5	94.3	101.7	4.83
BHP 70FS	55.33	65.67	68.87	76.75	82.05	84.34	4.85

BHP : Béton à haute performance, 70 est la résistance à la compression mesurée à 28j et FS : composition avec fumé de silice.

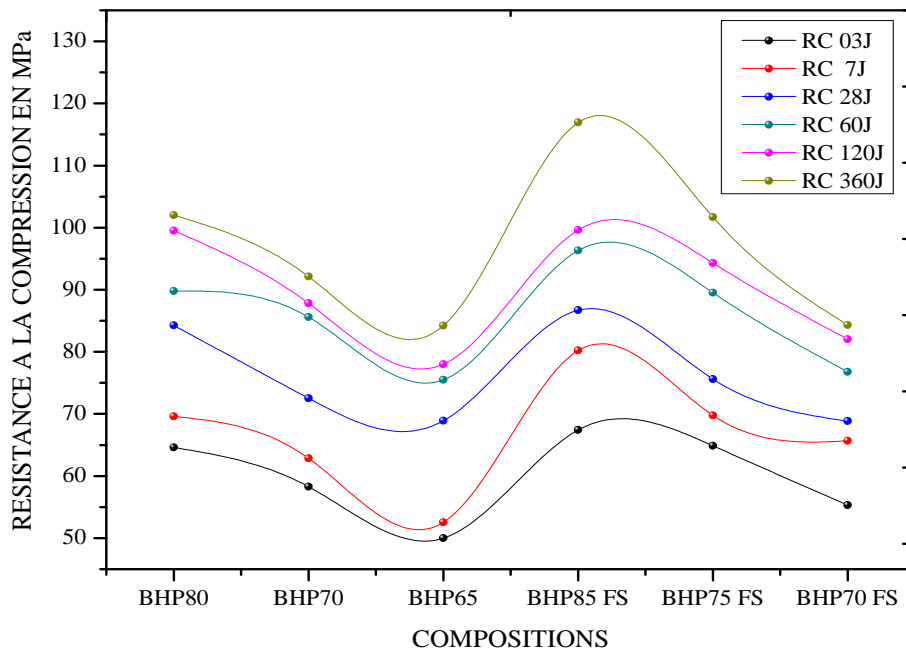


Figure III.8 : Evolution de la résistance mécanique à la compression.

Les courbes de la figure III.08 montrant l'évolution de la résistance mécanique à la compression au cours du temps démontrent clairement que les BHP contenant de la fumée de silice surpassent légèrement en performance ceux qui n'en contiennent pas. En outre, la

résistance mesurée à un jeune âge (après 3 jours de durcissement) représente 80 % de la résistance à la compression enregistrée après 28 jours.

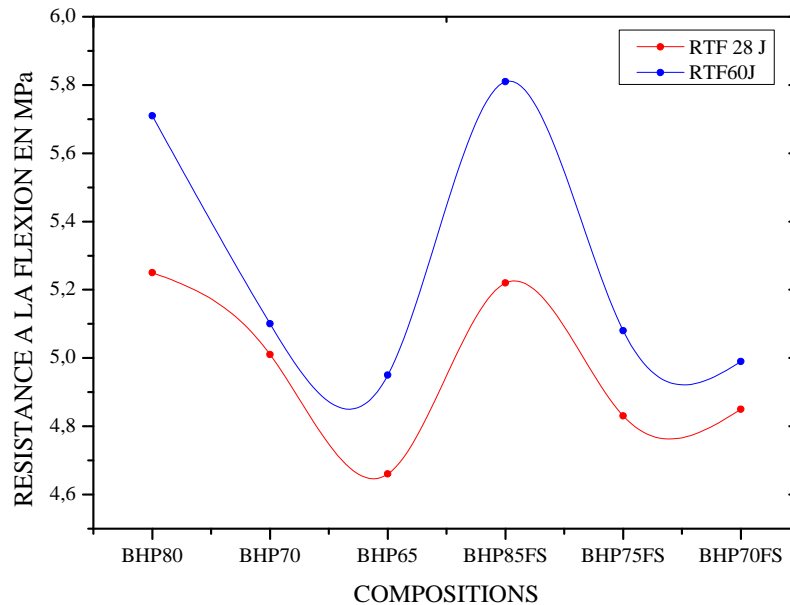


Figure III.9 : Résistance mécanique à la flexion.

L'évolution de la résistance mécanique à la flexion des BHP formulés, comme l'illustre la figure III.09, demeure limitée, ne dépassant pas 6,00 MPa après 60 jours de durcissement.

III.4 Etude comparative

Dans ce qui suit nous essayons de comparer les résultats obtenus pour notre étude et ceux obtenus dans le cadre de projet national français BHP 2000 [67], [52].

- Formulation :

Le tableau III.19 et III.20 illustrent la formulation ainsi que les caractéristiques physico-mécaniques de BHP 2000 à l'état frais et durci. [67], [52].

Les constituants utilisés pour la formulation des BHP sont de : ciment CPA-CEM I 52.5, cendre volante silico-alumineuses CV, fumé de silice FS, gravillons calcaires concassés du Boulonnais 0/5-5/12.5-12.5/20, sable silico-calcaire de Seinz0/4, superplastifiant SP, retardateur et un agent entraîneur d'air AEA.

Les BHP ont été formulés selon les principes suivants :

Le logiciel RENé-LCPC est utilisé pour établir le squelette granulaire, afin d'optimiser la granularité des matériaux en ingénierie [68].

La quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une rhéologie suffisamment stable dans le temps est établie par la méthode innovante des coulis AFREM, utilisée pour la formulation de bétons à hautes performances [04].

Afin d'assurer la résistance spécifiée à 28 jours, le rapport eau/liant a été modifié. Concernant les BHP, la quantité de fumée de silice a été ajustée en fonction de la résistance recherchée : 6 % pour le M75FS, 10 % pour le M100FS et 12 % pour le M120FS. Par ailleurs, une teneur en air de 5 à 7 % est prévue pour les bétons à air entraîné.

La quantité de pâte a été ajustée pour fournir la rhéologie recherchée. Pour les B H P, la propriété critique est souvent la viscosité plastique, que l'on a voulu réduire à des valeurs en dessous de 300 Pas (valeur mesurée au rhéomètre B T R H E O M, selon le mode opératoire précisé dans la référence) [69]. Globalement les différents constituants des BHP pour notre étude et celle de BHP 2000 sont semblables : granulats d'origine calcaire avec D_{max} 20 mm, ciment CEM I 52.5, fumé de silice, à l'exception de certaines formulations de BHP 2000, on observe l'inclusion de retardateurs de prise et d'entraîneurs d'air AEA. Une Comparaison des formulations proposées avec les BHP 2000 est regroupée dans le tableau II.19.

TABLEAU III.19 : Comparaison des formulations proposées avec les formulations de BHP 2000.

BETONS		G/S	C/F.S	SP EXTRAIT SEC KG/M³	AE A KG/M³	RETARDAT EUR KG/M³	E/C	E/L	AFFAISSEM ENT EN MM
PROJET									
01	BHP 80	1.57	-	6.84	-	-	0.25	0.25	230
	BHP 70	1.57	-	6.24	-	-	0.30	0.3	300
02	BHP 65	1.57	-	5.64	-	-	0.35	0.35	300
	BHP 85FS	1.57	0.11	10.26	-	-	0.27	0.25	230
03	BHP 75FS	1.57	0.11	9.36	-	-	0.33	0.30	300
	BHP 70FS	1.57	0.11	8.46	-	-	0.38	0.35	300
PROJET NATIONAL BHP 2000									
01 03	M75FSE A	1.20	0.06	12.9	0.58	2.9	0.34	0.32	250
	M75EA	1.39	-	14.8	0.98	3.9	0.27	0.27	265
	M75FS	1.27	-	12.4	-	3.3	0.32	0.32	250
02	M100FS	1.19	0.06	12	-	2.5	0.38	0.36	250
	M120FS	1.20	0.10	12.5	-	2.6	0.33	0.3	240
		1.21	0.12	15.6	-	3.3	0.26	0.23	245

TABLEAU III.20 : Comparaison des évolutions de résistance mécanique des formulations proposées avec les **BHP 2000**.

Bétons		Résistance à la compression en MPA						Résistance à la flexion en MPa
	Age	03j	07j	28j	60j	120j	1an	28j
01	BHP 80	64.59	69.42	84.26	89.8	97.5	102	5.25
	BHP 70	58.29	62.87	72.51	80.89	87.8	92.1	5.01
02	BHP 65	50.02	52.54	68.9	75.5	77	84.2	4.66
	BHP 85FS	67.41	80.25	86.71	95.48	99.63	116.93	5.22
03	BHP 75FS	64.86	69.78	75.62	89.5	94.3	101.7	4.83
	BHP 70FS	55.33	65.67	68.87	76.75	82.05	84.34	4.85
Projet National BHP 2000								
	Bétons	03j	07j	28j	90j			28j
	M75FSE A	39.7	51.7	71.7	80.1			4.7
01	M75EA	52	61.1	79.4	86.3			5.08
	M75	54.3	68.8	83.1	91.9			5.44
03	M75FS	42.9	58.2	81.4	91.0			4.81
02	M100FS	68.7	86.7	116.1	128.7			6.21
	M120FS	89.5	101.0	125.5	139.2			6.44

A l'état frais la maniabilité de nos compositions formulées a été remarquée meilleure à celle obtenue dans le cadre du projet National français **BHP 2000** voir [tableau III.19](#).

Le [tableau III.20](#) présente les valeurs de résistance mécanique à la compression obtenues lors de notre étude, pour un jeune âge de durcissement de 3 à 7 jours, nous remarquons que toutes les compositions à formulations semblables avec le projet **BHP 2000** (à l'exception la composition M120 FS) ont des résistances mécaniques à la compression supérieures à celle obtenus dans le cadre du projet National français **BHP 2000**.

III.5 synthèse de chapitre :

A l'issue de cette étude de recherche on peut tirer les principaux résultats obtenus comme suit :

- L'examen de la compacité des mélanges granulaires à l'état sec, effectué par un simple versement (comprenant des mélanges binaires, ternaires, quaternaires et quintuples), a démontré que la valeur maximale de compacité granulaire a été obtenue pour un mélange

quintuple c'est-à-dire un mélange qui composé de cinq classes granulaires dont deux types de sables ont été employés un type calcaire concassé et l'autre naturel. La valeur maximale de la compacité atteint 78.84% avec un rapport **G/S** égal à **1.5**.

- Les bétons à hautes performances, qu'ils soient étudiés avec ou sans fumé de silice, présentent à l'état frais une fluidité très élevée, dépassant la valeur de 220 mm.
- À un jeune âge, après trois jours de durcissement, la résistance à la compression de toutes les compositions dépasse le **50 MPa** et atteint **67.41 MPa** c'est-à-dire atteint **77.74%** la résistance mesurée à l'âge de 28 jours de durcissement pour la composition **BHP 85 FS**, cette caractéristique contribue à diminuer le temps consacré au coffrage et à raccourcir le délai d'exécution.
- Les données révèlent qu'un béton à haute performance peut être élaboré sans recourir à la fumée de silice. À 28 jours de durcissement, sa résistance mécanique à la compression s'élève à **84,26 MPa** et dépasse les **100 MPa** après une année de durcissement.
- La comparaison de nos résultats avec ceux issus du projet national français **BHP 2000** a montré que nos compositions se distinguent par une maniabilité et une résistance à la compression à un jeune âge supérieures.

IV.1 Introduction : Les effluents agroalimentaires et industriels tels que l'acide acétique et l'acide sulfurique sont des milieux très agressifs pour les structures en béton. En ce sens, la présente analyse a été orientée vers (I) l'évaluation de la durabilité des compositions en BHP, avec et sans l'incorporation de fumé de silice aux effets uniques des deux types d'acides sulfurique H_2SO_4 et acétique CH_3COOH . (II) Analyse de la durabilité des compositions en BHP, avec et sans ajout de fumé de silice, en tenant compte des effets de mélange des acides sulfurique (H_2SO_4) et acétique (CH_3COOH) à une concentration de 5% pour chacun, à une température ambiante de 20°C. (III) Analyse de la durabilité des BHP en présence et en absence de fumé de silice face aux effets de mélange d'acides sulfurique H_2SO_4 et acétique CH_3COOH sous l'effet combiné des cycles gel/dégel et sous l'effet d'une température élevée de 50°C.

IV.2 Résultats et discussion :

IV.2.1 Attaque uniques de l'acide sulfurique et acétique :

IV.2.1.1 Evolution de PH: la figure IV.1 illustre la variation du pH des solutions acides suite à l'immersion des éprouvettes en BHP avec et sans fumé de silice. D'après les résultats on constate une augmentation rapide de pH pour la solution à base d'acide acétique car il atteint une valeur de 4 après 24 heures d'immersion des éprouvettes. Cependant, les valeurs de pH restent stables jusqu'à 10 jours d'immersion des éprouvettes pour la solution à base d'acide sulfurique, il atteint la valeur de 4 après 15 jours. Ceci peut être expliqué par le phénomène de la dissociation des acides forts et faibles.

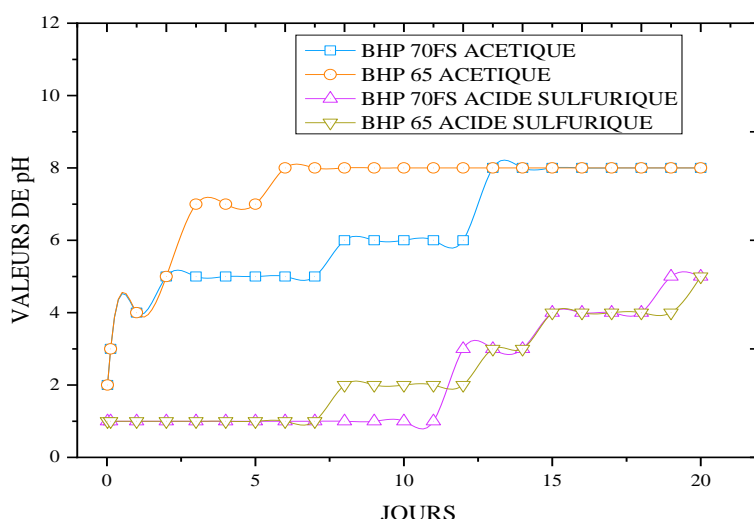


Figure IV.01 : Evolution de PH des solutions acides après immersions des éprouvettes en BHP

IV.2.1.2 Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure IV.02 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai.



Figure IV.02a : Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes.

- Acide acétique : les éprouvettes conservées dans la solution à base d'acide acétique ont été caractérisées par une surface lisse sans fissures de couleur marron claire. Après le découpage des éprouvettes aucune modification n'a été observée à l'intérieur des éprouvettes en BHP. Le changement de couleur apparait uniquement à la surface voir figure IV. 2a.
- Acide sulfurique : les éprouvettes ont été caractérisées par un aspect blanchâtre et avec une rugosité de surface. À l'intérieur aucune dégradation n'a été observée La dégradation apparaitre uniquement à la surface voir figure IV.02a.

IV.2.1.3 Profondeur altérée : à la fin d'essai les éprouvettes ont été découpées perpendiculairement et traitées avec une solution de phénophtaléine à 1 % pour évaluer les zones saines et altérées des éprouvettes.

Le test de phénophtaléine est effectué sur les sections des éprouvettes à la fin d'essai d'attaque par l'acide acétique et sulfurique montre la coloration de toute la section sciées voir figure IV.02a, ceci a été clarifié par la dissolution de l'ensemble de la surface dégradée des éprouvettes. L'histogramme présenté dans la figure IV.2b illustre l'évolution de la profondeur altérée. Selon les résultats, la profondeur altérée pour l'attaque par l'acide acétique ne dépasse pas les quelques micromètres pour les deux compositions de BHP, tandis, la dégradation de

béton par l'acide sulfurique atteint 1.2mm après 120 jours d'immersion des éprouvettes dans la solution agressive.

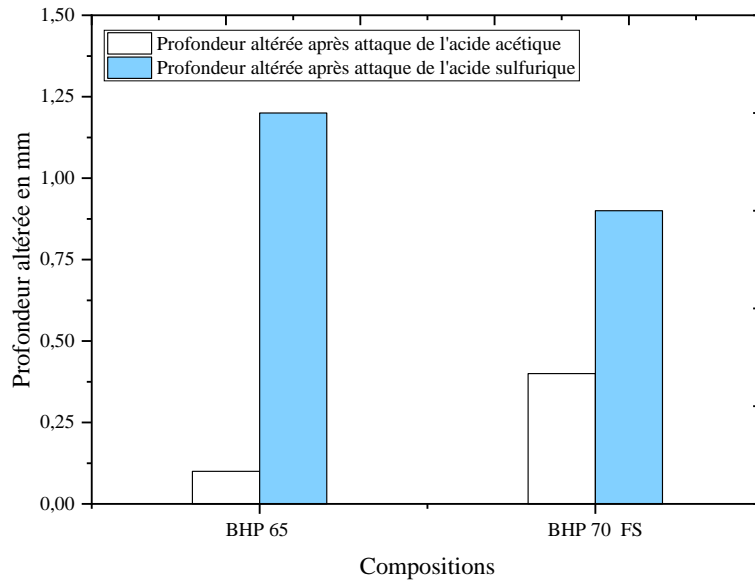


Figure IV.02b : Profondeur altérée après l'attaque de l'acide acétique et sulfurique.

IV.2.1.4 Perte relative de masse :

- Acide acétique : Au cours du premier mois, les pertes relatives de masse sont quasiment identiques pour les deux compositions avec et sans fumé de silice. A partir de deuxième mois d'attaque par l'acide acétique, on constate que l'incorporation de fumée de silice dans la formulation de BHP permet de diminuer légèrement les masses, le taux de pertes ne dépassant pas le 1.5% après 120 jours d'immersion dans la solution d'acide voir [figure IV.03](#).
- Acide sulfurique : Les courbes d'évolution des pertes relatives de masse des échantillons exposés à une solution d'acide sulfurique nous ont montré que le taux des pertes est remarquable comparativement aux attaques par l'acide acétique. Les compositions sans fumée de silice présentent un taux de variation de masse observé de 5 % après 120 jours dans la solution [figure IV.03](#).

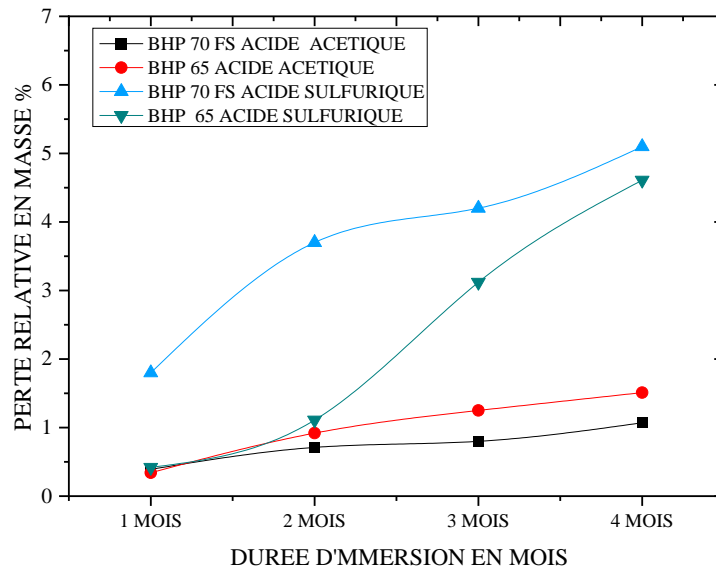


Figure IV.03: Variations relatives de la masse après l'interaction avec l'acide acétique et l'acide sulfurique.

IV.2.1.5 Porosité accessible à l'eau : Selon l'histogramme de la figure IV.04, on observe une légère augmentation de la porosité accessible à l'eau des échantillons après l'exposition aux acides acétique et sulfurique.

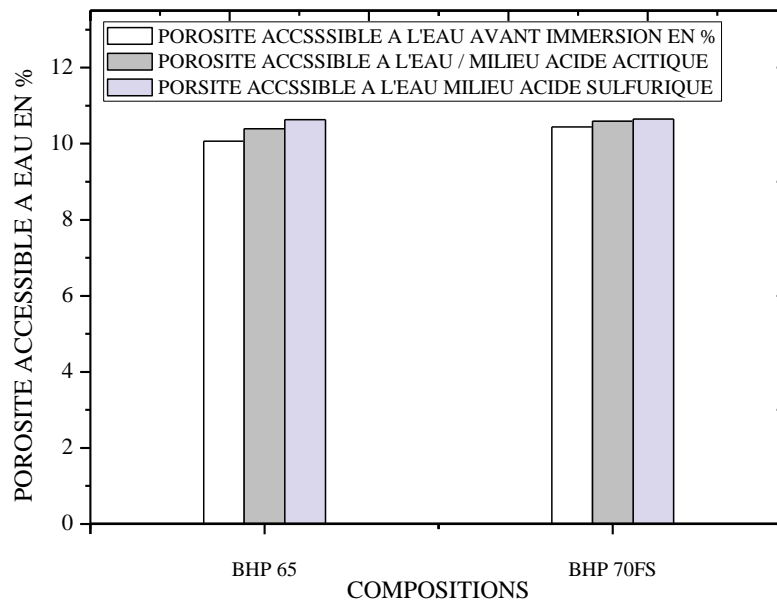


Figure IV.04 : Variation de la porosité accessible à l'eau des échantillons avant et après l'exposition à l'acide acétique et à l'acide sulfurique.

IV.2.1.6 Résistance mécanique : La figure IV.05 présente un histogramme qui met en évidence les variations de la résistance mécanique à la compression des échantillons de BHP testés avant et après l'attaque par les deux types d'acide acétique et sulfurique durant 120 jours. On remarque que les échantillons de BHP présentent une résistance mécanique à la compression lorsqu'ils sont soumis à l'attaque de l'acide acétique est légèrement influencées le taux de réduction maximal atteint 3,73 %.

Une diminution notable de la résistance a été constatée aux niveaux des BHP immergées dans une solution à base d'acide sulfurique, le taux de réduction s'élève à 46 %, ce qui peut être attribué à la dégradation de la surface, entraînant une diminution de la ténacité du matériau et, par conséquent, une propagation plus facile des fissures lors de l'écrasement des éprouvettes, ce qui accélère la rupture du matériau.

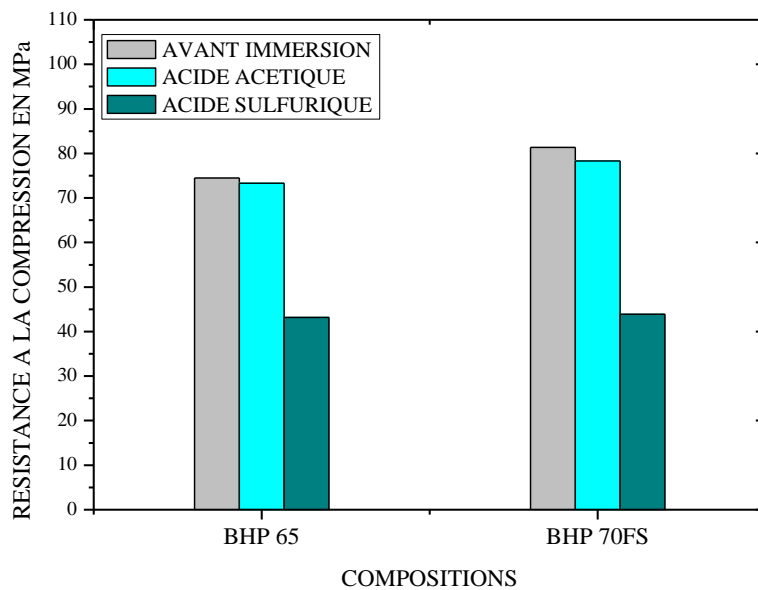


Figure IV.05 : Variation de la résistance mécanique à la compression des échantillons avant et après immersion dans l'acide acétique et de l'acide sulfurique.

IV.2.1.7 Comparaison des résultants

Les compositions de BHP formulés présentent une très bonne résistance aux attaques par l'acide sulfurique, et ce malgré que les granulats employés sont réactives. Les pertes relatives de masses n'excèdent pas le 4%, après 04 mois d'immersion dans la solution dosé de 5% d'acide sulfurique. Une comparaison des résultats obtenus par certains auteurs, dans le cadre d'étude de la durabilité des BHP aux attaques par l'acide sulfurique sont résumés dans ce

que suit : **Shweta Goyal et al [18]**, ont étudié la durabilité des BHP aux agressions de l'acide sulfurique à une concentration de 1 %. Ces BHP ont été élaborés avec et sans ajout de fumée de silice, en utilisant des granulats concassés de type granit et du sable naturel des rivières. Selon les résultats obtenus par **Shweta Goyal**, les pertes relatives de masses atteint le 7% après 04 mois d'immersion dans la solution dosé de 1% d'acide sulfurique pour la composition M2-II (composition avec 5% de fumé de silice, $E/C=0.35$, $R_{c28}=83.5\text{MPa}$, affaissement=20.4cm) voir figure IV.06 **E. Hewayde and al [74]**, ont été montrés que les pertes relatives de masses pour un BHP atteint 19% après 61 jours d'immersion des éprouvettes dans une solution de 3% d'acide sulfurique et 30% après 61 jours d'immersion des éprouvettes dans une solution de 7% d'acide sulfurique malgré que ce BHP a été fabriqué par des granulats siliceuses (composition avec et sans fumé de silice, $E/C=0.35$, $R_{c28}=57.6\text{MPa}$ et 68MPa , affaissement=5cm) voir figure IV.07. **R. Sri Ravindrarajah [22]**, s'intéresse dans une recherche à la durabilité des bétons à hautes performances enrichis en fumée de silice lorsqu'ils sont exposés à des attaques d'acide sulfurique. La concentration des solutions acides a été maintenue à 15 %. Les résultats révèlent que l'incorporation de fumée de silice nuit à la résistance des BHP face à l'acide sulfurique, le taux de diminution de masse maximale atteint le 20% après 30 jours d'immersion dans la solution agressive voir figure IV.08.

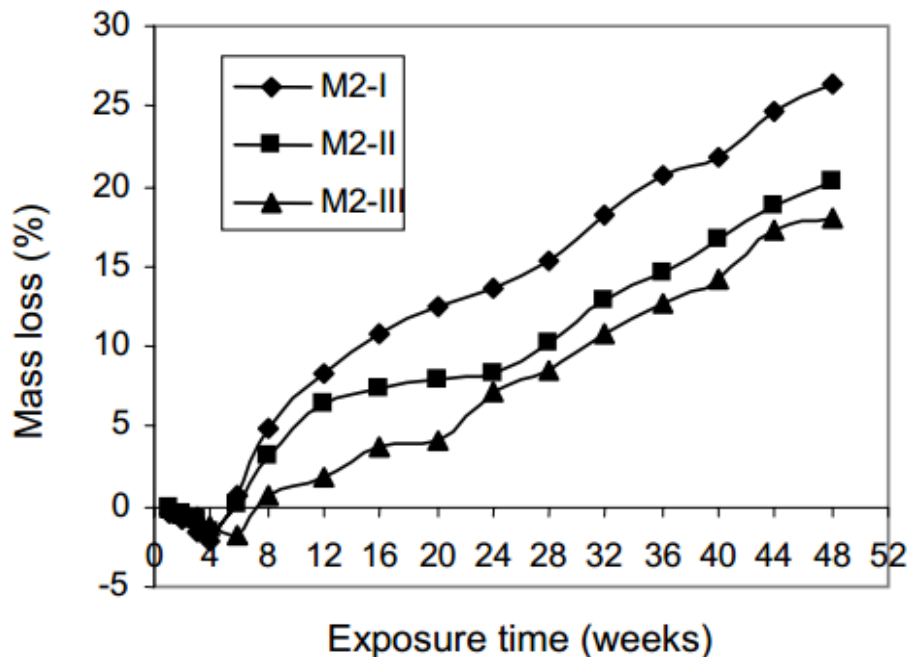


Figure IV.06 : Diminution relative de la masse des BHP plongés dans une solution d'acide sulfurique à 1 % sur une période allant jusqu'à 48 semaines **Shweta Goyal [18]**

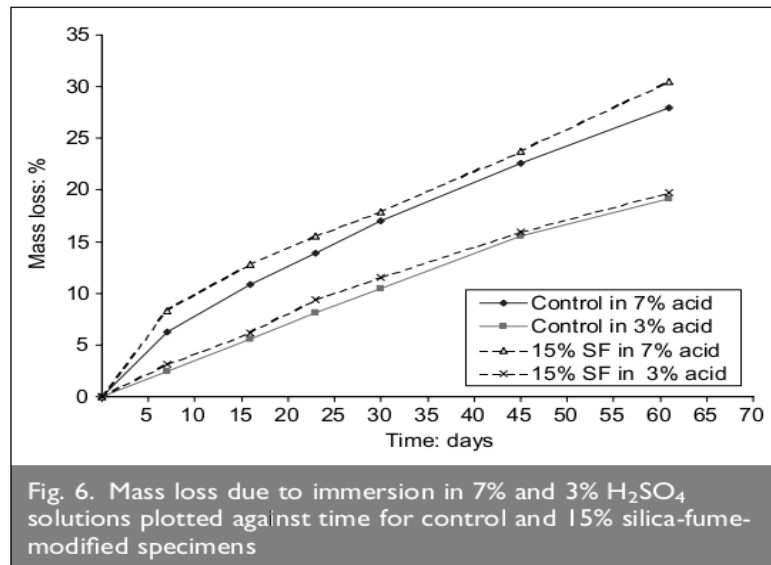


Figure IV.07: Diminution relative de la masse des BHP plongés dans une solution d'acide sulfurique de 03% et 7% jusqu'à 61 jours. **E. Hewayde[74]**

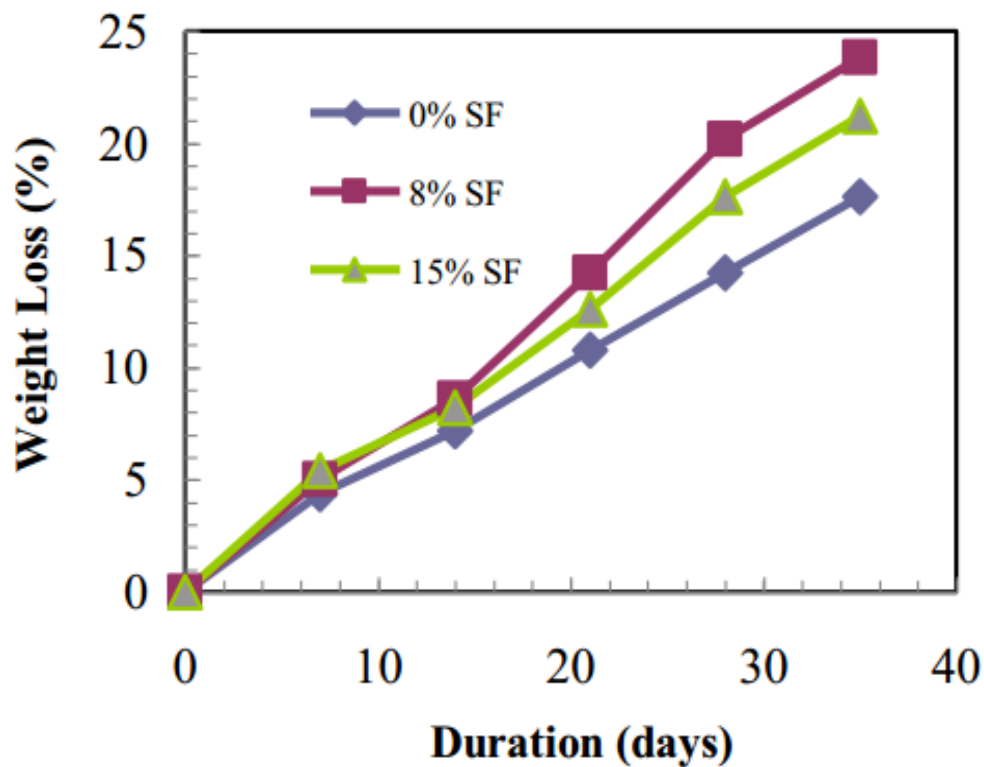


Table IV.06: Comparaison des résultants

	Pertes relatives de masses							
	5% d'Acide sulfurique Recherche		1% d'Acide sulfurique Shweta Goyal [18]		3% d'Acide sulfurique E. Hewayde [74]		15% d'Acide sulfurique R. Sri Ravindrarajah [22]	
	BHP	BHP FS	BHP	BHP FS	BHP	BHP FS	BHP	BHP FS
Après 30 jours	0.42	1.8	-2%	-2%	10%	10%	20%	14%
Après 60 jours	1.11	3.7	5%	3.5%	18%	19%	-	-
Après 90 jours	3.12	4.2	7%	6%	-	-	-	-
Après 120 jours	4.61	5.1	11%	7%	-	-	-	-

VI.2.2 Attaque par un mélange d'acides sous une température ambiante 20C°:

VI.2.2.1 Evolution de pH : La figure IV.09 illustre l'évolution du pH des diverses solutions de mélanges d'acides avec des échantillons de BHP. Les résultats indiquent que le pH reste inférieur à 2 durant les dix10 jours premier et atteint la valeur 4 est enregistrée après 15 jours d'exposition des éprouvettes à la solution d'acides combinés.

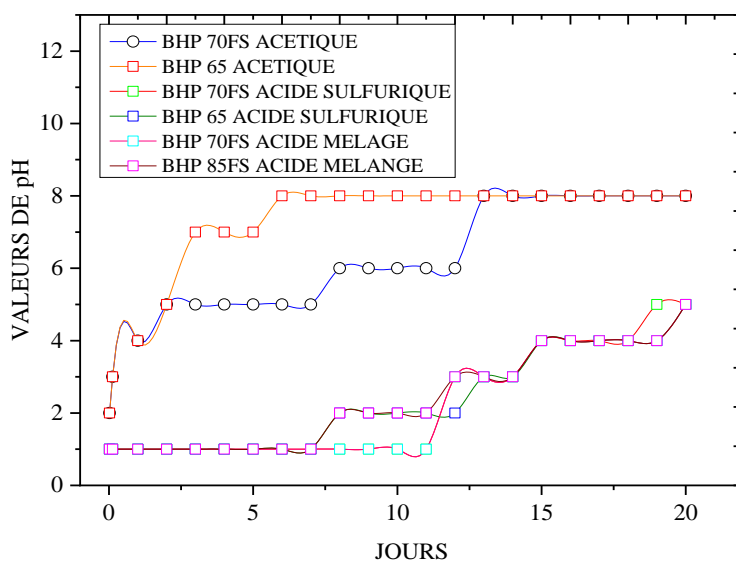


Figure IV.09 : Evolution du pH des solutions acides suite à l'immersion des éprouvettes en BHP à une température de 20 °C.

VI.2.2.2 Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure IV.10 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai. Les éprouvettes ont été caractérisées par un aspect blanchâtre et avec une rugosité de surface. À l'intérieur aucune dégradation n'a été observée La dégradation apparaitre uniquement à la surface.



Figure IV.10 : Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais sous une température de 20C°.

VI.2.2.3 Profondeur altérée : selon la photo de la [figure IV.10](#) aucune modification n'a été observé à l'intérieur de béton, le test de phénophtaléine indique que certaines formulations, en particulier celles contenant du fumé de silice ont une couleur claire, cela peut être attribué à la réduction du pH à l'intérieur des sections en béton. La courbe présentée dans la [figure IV.11](#) montre l'évolution longitudinale de la profondeur altérée des différentes compositions des BHP examinés, l'intervalle de son variation entre 1.5-2mm. Ces valeurs ont été notées comme étant significatives par rapport aux profondeurs résultant d'une attaque unique des acides.

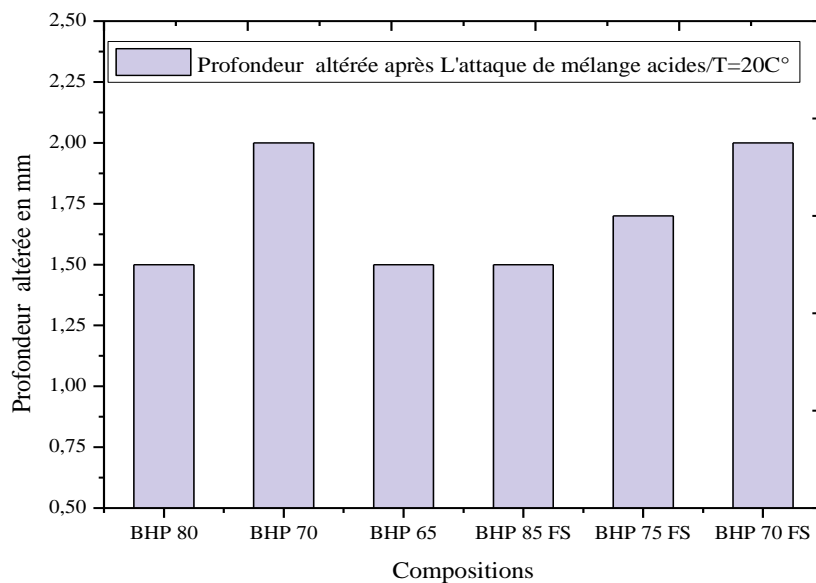


Figure IV.11 : La profondeur altérée après l'exposition à un mélange d'acides à une température de 20 °C.

VI.2.2.4 Interprétation des résultats en fonction des facteurs de composition :

VI.2.2.4.1 Perte relative de masse :

La figure IV.12 montre l'évolution des taux de variation de la masse des différentes formulations de BHP testées dans un environnement agressif de mélange d'acides.

Les résultats indiquent une élévation des pertes relatives de masse des échantillons en fonction du temps d'immersion des éprouvettes dans la solution acide. De plus, l'ajout de fumée de silice entraîne une augmentation des pertes relatives par rapport aux compositions de BHP sans ajout, cette augmentation a été remarquée importante pour les compositions à faibles rapports E/L (comparaison entre BHP 80 et le BHP 85 FS) à l'exception de BHP 70.

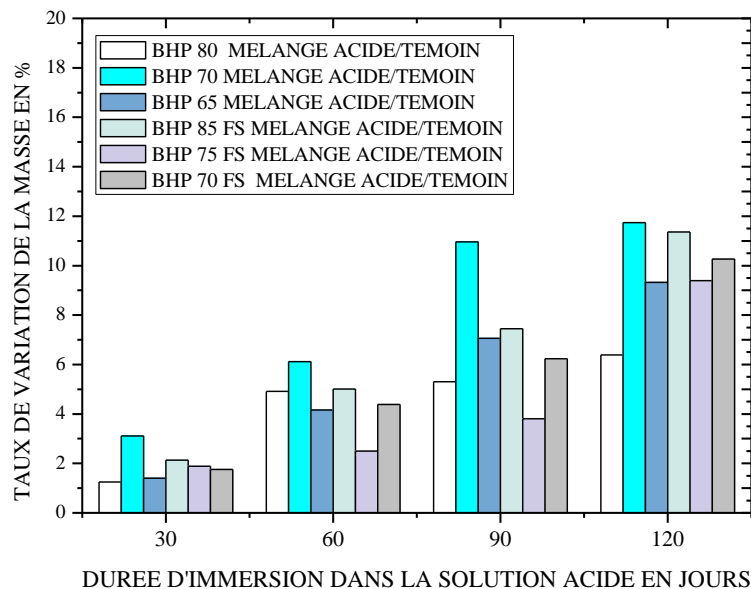


Figure IV.12 : Diminution relative de la masse suite à l'attaque par un mélange d'acides à une température de 20 °C.

VI.2.2.5 Interprétation des résultats en fonction des caractéristiques physico-mécaniques :

VI.2.2.5.1 Porosité accessible à l'eau : L'histogramme présenté dans la figure IV.13 illustre les valeurs de la porosité accessible à l'eau pour les diverses compositions de BHP, tant avant qu'après l'épreuve l'attaques par un mélanges d'acides. Les résultats montrent une augmentation dans les valeurs de la porosité à la fin d'essai dans toutes les compositions de BHP. Ainsi, le taux d'augmentation a été observé un peu supérieur pour les compositions avec fumé de silice mais pas vraiment significative.

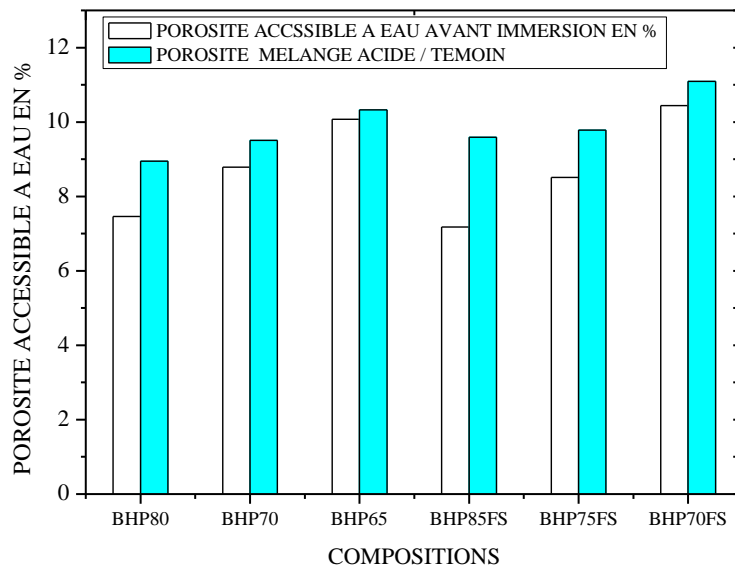


Figure IV.13 : Variation de la porosité accessible à l'eau des échantillons avant et après l'attaque de mélange d'acides sous une température de 20C°.

VI.2.2.5.2 Vitesse du son : Dans l'histogramme de la figure IV.14, on peut observer la variation de la vitesse du son des BHP avant et après l'attaque par un mélange d'acides. Une diminution de la vitesse du son a été constatée dans toutes les compositions, avec un taux de réduction maximal dans celles qui contiennent du fumé de silice.

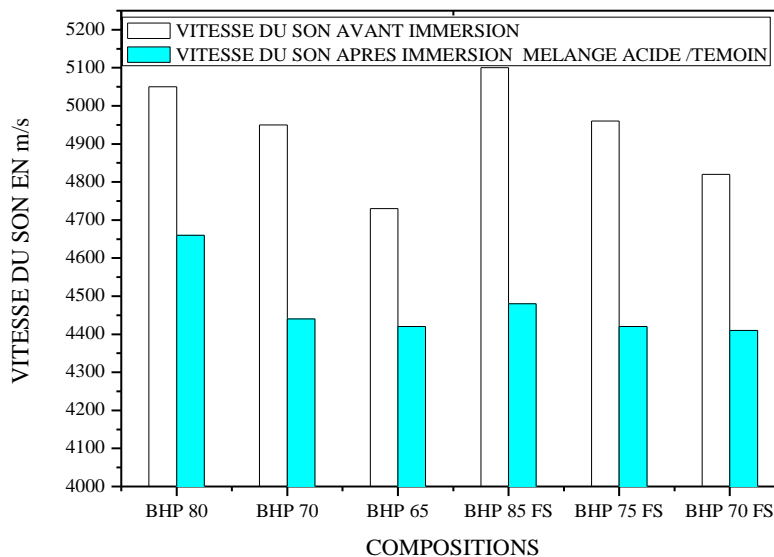


Figure IV.14: Variation de la vitesse du son avant et après l'interaction des acides à une température de 20 °C.

VI.2.2.5.3 Variation dimensionnelle : Les variations des dimensions longitudinales ont été mesurées à la fin d'essai. Le taux de variation dimensionnelle dans la figure IV.15 pour toutes les compositions des BHP a été remarqué faible son intervalle varie entre 0.69%-0.76%.

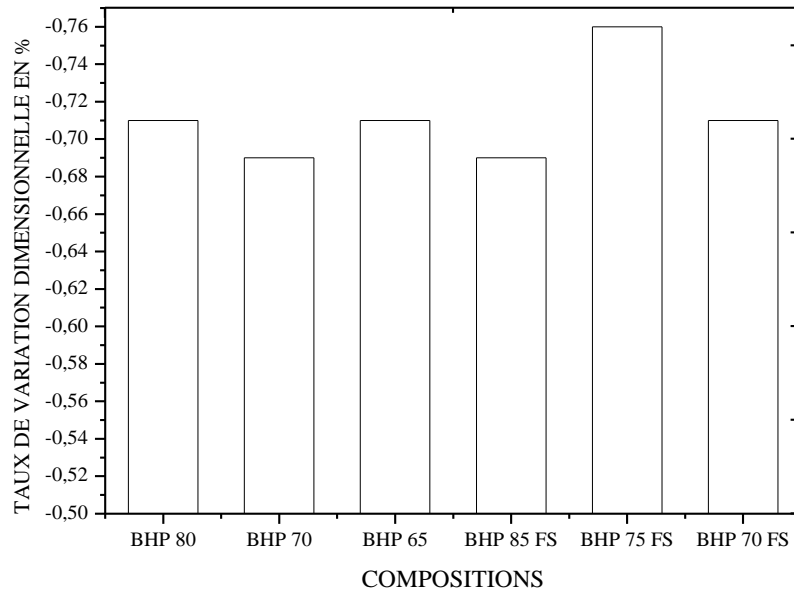


Figure IV.15: Taux de variation dimensionnelle avant et après l'attaque de mélange d'acides sous une température de 20C°.

VI.2.2.5.4 Résistance mécanique : La figure IV.16 illustre l'évolution de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes avant leur immersion dans une solution agressive à base de mélanges d'acides, ainsi que la résistance mécanique à la compression après 120 jours d'immersion des échantillons dans ce milieu corrosif. On note une chute significative des valeurs de résistance mécanique à la compression pour toutes les compositions des BHP. Le taux de diminution maximal a été observé dans les compositions contenant de la fumée de silice. Ces résultats peuvent être interprétés comme suit :

Il est reconnu que l'utilisation de fumée de silice dans le béton réduit sa perméabilité par la diminution du volume des pores et la modification de leur taille, en raison de la réaction pouzzolanique entre la silice réactive et la portlandite. Par ailleurs, la fumée de silice réduit également la concentration de la portlandite dans le béton. Cependant, la proportion de gel **C-S-H** dans le béton contenant de la fumée de silice augmente, ce qui améliore sa résistance.

Lorsque le béton à base de fumée de silice est exposé à une forte concentration l'acide sulfurique, l'acide sulfurique décompose la matrice cimentaire par la décalcification du silicate de calcium hydraté **C-S-H**, ce qui provoque une augmentation de la corrosion du béton et donc une réduction de forme déjà observée. Ces résultats concordent avec les observations faites par **R. Sri Ravindrarajah [22]** et **L. Laoufi [50]**.

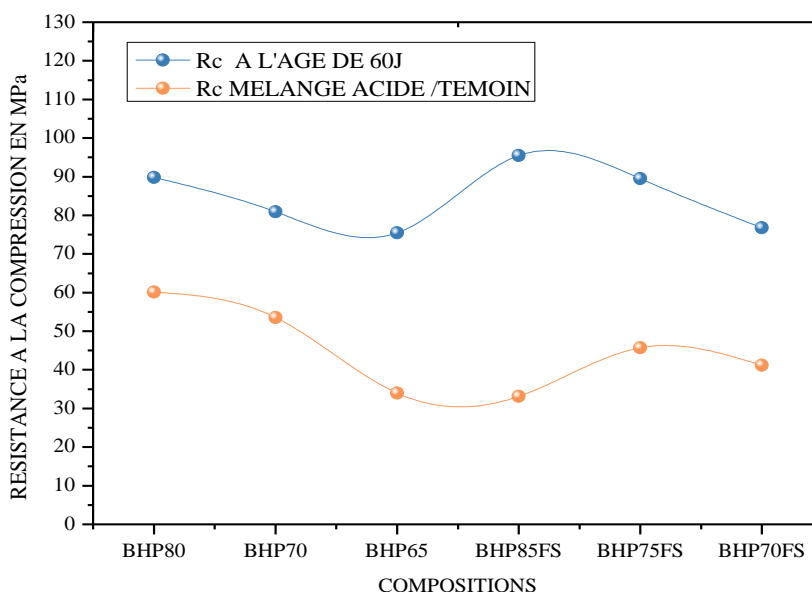


Figure IV.16: Variation de la résistance à la compression avant et après l'interaction avec un mélange d'acides à une température de 20 °C.

VI.2.2.6 Etude comparative

VI.2.2.6.1 Evolution de pH : Les relevés de pH effectués sur les échantillons de diverses solutions ont montré une augmentation rapide de pH pour la solution à base d'acide acétique car il atteint la valeur de 4 après un jour d'immersions des éprouvettes. Tandis, les valeurs de PH mesurés pour les solutions à base d'acide sulfurique et à base de mélange d'acides restent inférieur à 2 jusqu'à 10 jours et atteint la valeur de 4 après 15 jours d'immersion des échantillons dans les solutions. Ceci peut être expliqué par le processus de dissolution des acides forts et faibles.

VI.2.2.6.2 Perte relative de masse :

Les résultats indiquent que les BHP, qu'ils soient incorporés ou non avec de la fumée de silice sont légèrement détériorés par l'acide acétique, dont le taux des pertes n'excèdent pas le 1.5% après 120 jours d'immersion dans la solution d'acide. L'agression des BHP par l'acide sulfurique engendre des pertes de masse d'environ 5 %, ce qui équivaut à 3,4 fois les pertes de masse relatives dues à l'acide acétique après 120 jours dans la solution. Tandis, la détérioration des BHP par le mélange d'acides a été remarqué la plus grave la valeur maximale de la perte relative de masse atteint 9.39% donc 6 fois les pertes relatives de masses résultent par l'agression de l'acide acétique et presque 2 fois les pertes relatives de masses résultent par l'agression de l'acide sulfurique voir [figure IV.17](#).

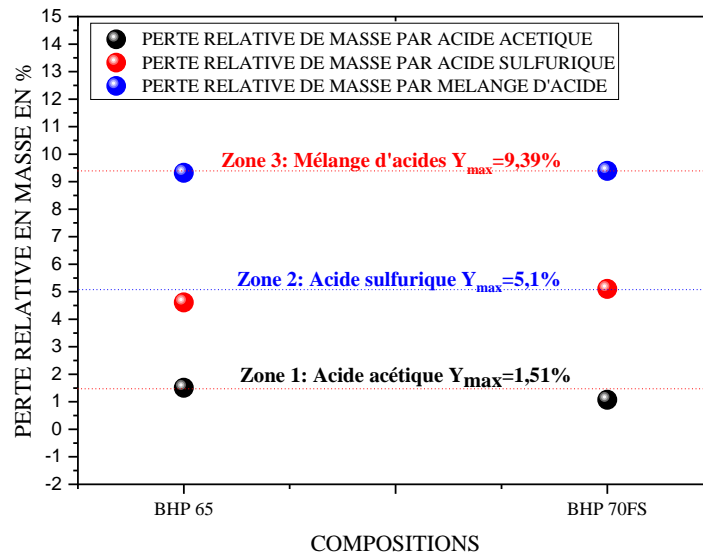


Figure IV.17: Comparaison des pertes relatives de masse engendrées par l'attaque d'un mélange d'acides à une température de 20 °C.

VI.2.2.6.3 Porosité accessible à l'eau : Une légère augmentation de la porosité accessible à l'eau des échantillons est observée après l'exposition aux deux types d'acides, à savoir l'acide acétique et l'acide sulfurique, ainsi qu'à leur mélange. D'après les résultats présentés dans la figure IV.18, l'augmentation maximale de la porosité pour l'échantillon de BHP sans fumée de silice ne dépasse pas 0,56 % par rapport à la valeur initiale de la porosité avant l'immersion des éprouvettes dans la solution acide, tandis que pour l'échantillon de BHP avec fumée de silice, cette augmentation atteint 0,65 %.

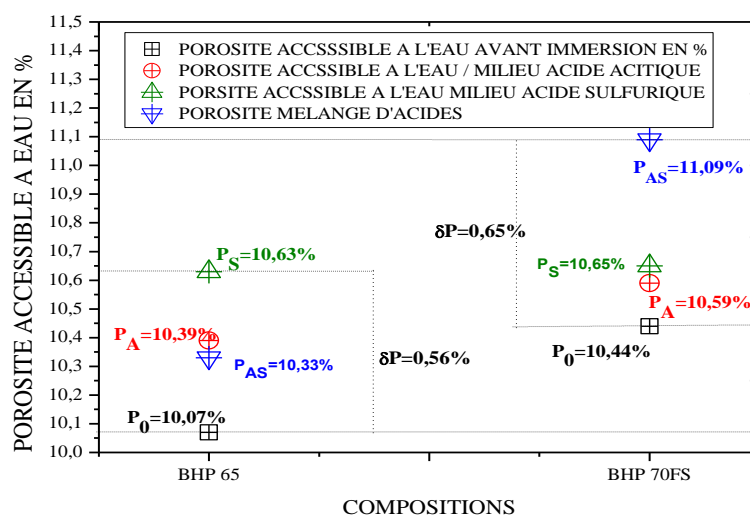


Figure IV.18 : Analyse de la porosité accessible à l'eau après l'attaque de mélange d'acides sous une température de 20°C°.

VI.2.2.6.4 Résistance mécanique : Il est observé que la résistance mécanique à la compression des échantillons de BHP soumis à l'acide acétique est légèrement affectée, avec un taux de diminution maximal de 3,73 %. Une diminution significative de la résistance a été notée pour les BHP immergées dans une solution d'acide sulfurique et un mélange d'acides, où les taux de diminution atteignent 46 %, comme l'illustre la figure IV.19, bien que le cœur des éprouvettes reste sain et que la dégradation se produise uniquement à la surface.

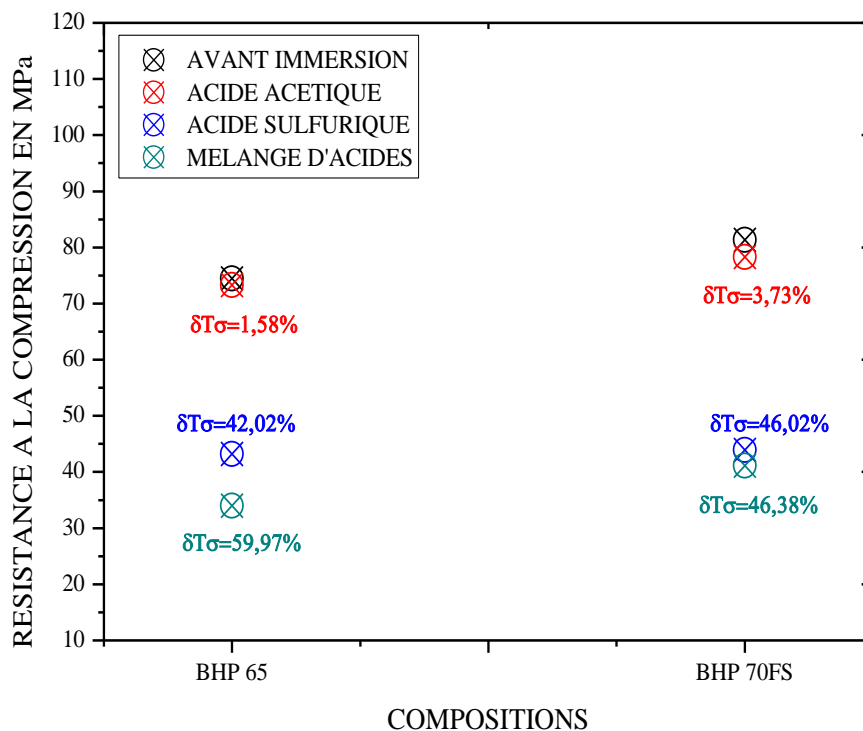


Figure IV.19: Comparaison des résistances à la compression après l'agression des acides à une température de 20°C.

IV.2.3 Attaque des mélanges d'acides combinés à l'effet de gel/dégel :

IV.2.3.1 Evolution de PH : La figure IV.20 représente la variation du pH des différentes solutions de mélanges acides avec échantillons de BHP combinés à l'effet des cycles gel/dégel. Les résultats montrent que le PH reste stable et égal à 1 durant les six 6 jours premier et atteint la valeur de 4 après 12 jours d'immersion.

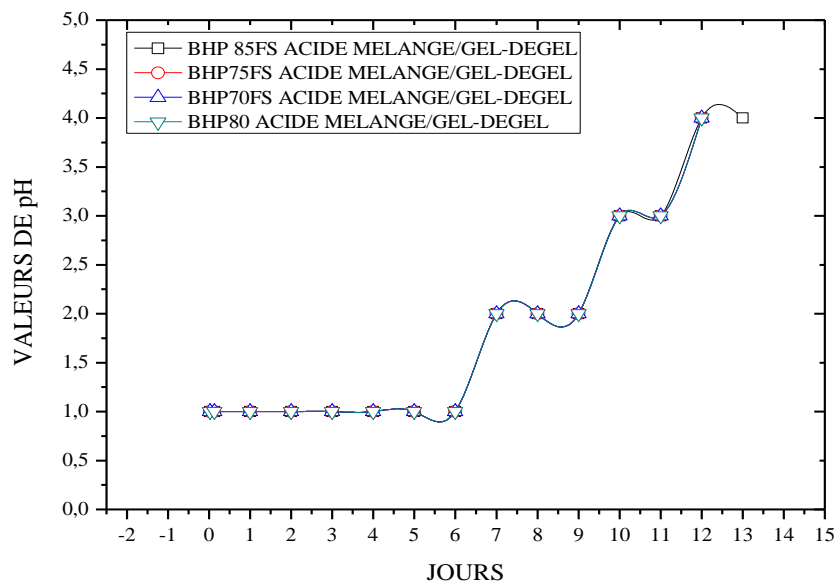


Figure IV.20: Variation du pH des solutions acides après l'interaction avec un mélange d'acides, sous l'effet des cycles gel/dégel.

IV.2.3.2 Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure IV.21 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai. Les éprouvettes ont été caractérisées par un aspect blanchâtre et avec une rugosité de surface. À l'intérieur aucune dégradation n'a été observée. La dégradation apparaît uniquement à la surface.

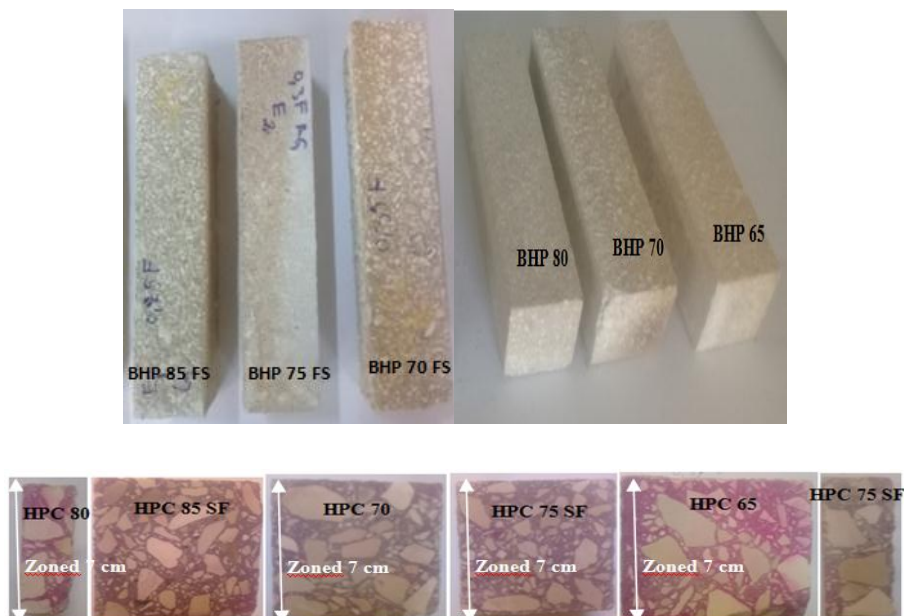


Figure IV.21 : Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.

IV.2.3.3 Profondeur altérée : selon la photo de la figure IV.21 aucune modification n'a été observé à l'intérieur de béton, le teste de phénophtaléine montre que les profondeurs altérés ont été observées sont supérieures pour les formulations contenant du fumé de silice. La courbe présentée dans la figure IV.22 illustre l'évolution longitudinale de la profondeur altérée pour diverses compositions des BHP examinées, l'intervalle d son variation entre 1 - 2mm.

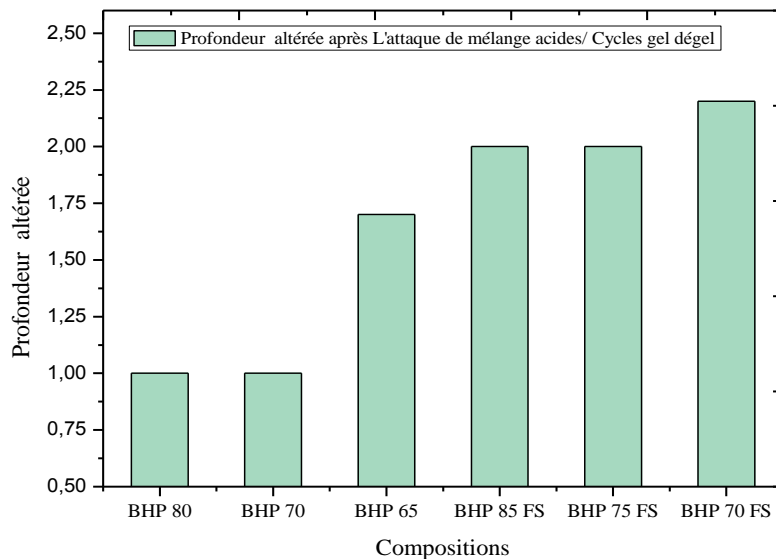


Figure IV.22: Profondeur altérée des éprouvettes après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.

IV.2.3.4 Perte relative de masse : Il a été constaté que le taux de variation des masses demeurait identique durant une période de 90 jours d'immersion des éprouvettes dans la solution agressive et sous l'influence du gel/dégel, comme le montre l'histogramme de la figure IV.23. Dans le dernier mois, le taux de variation des masses des échantillons avec ajout de fumée de silice a été observé comme étant supérieur à celui des échantillons sans cet ajout. Il est essentiel de souligner que les taux de variation des masses des échantillons soumis à l'effet de gel/dégel sont inférieurs à ceux enregistrés à une température ambiante de 20°C voir histogramme de la figure IV.24.

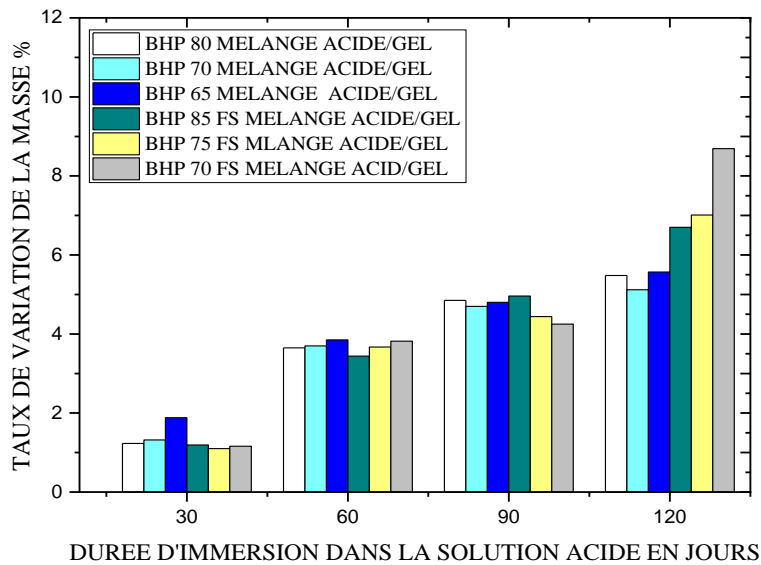


Figure IV.23 : Evolution des masses après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel. .

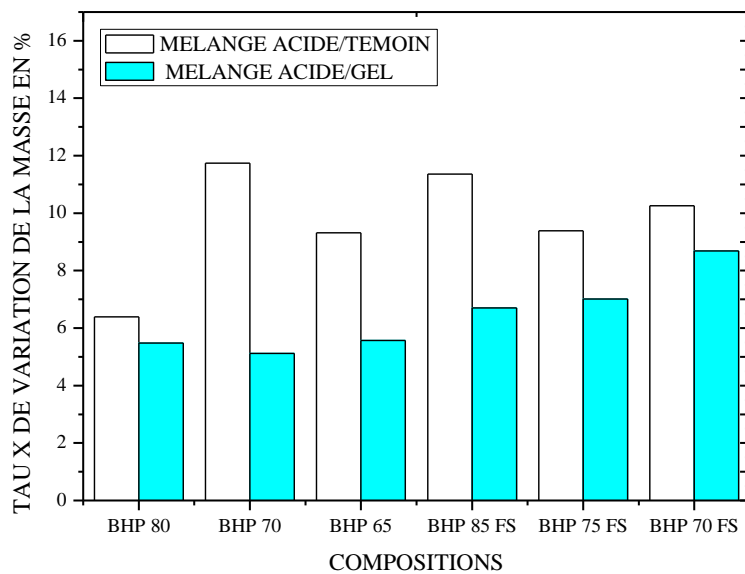


Figure IV.24: Pertes relatives de masse après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel

IV.2.3.5 Porosité accessible à l'eau : la figure IV.25 montre un histogramme qui illustre les valeurs de la porosité accessible à l'eau des différentes formulations de BHP, avant et après le test de la résistance chimique aux mélanges d'acides à une température ambiante de 20C° et

aux mélanges d'acides sous l'impact des cycles de gel et de dégel, les résultats indiquent une élévation des valeurs de porosité à la conclusion de l'essai pour toutes les compositions de BHP comparativement à la porosité mesurée avant immersion des éprouvettes dans la solution agressive. Ainsi, le taux d'augmentation a été observé un peu élevé pour les compositions avec fumé de silice. L'augmentation de la porosité a été remarquée inférieure à celle mesurée à une température ambiante de 20C°.

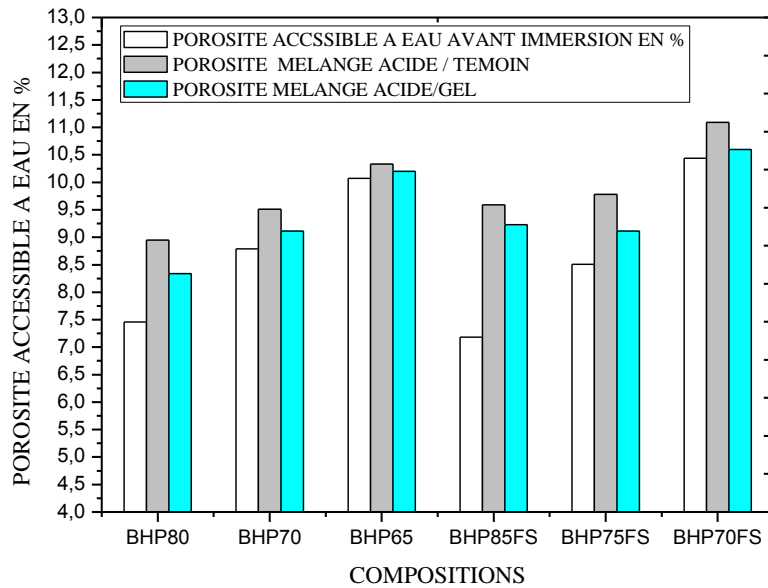


Figure IV.25: Évolution de la porosité accessible à l'eau avant et après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel

IV.2.3.6 Vitesse du son :

L'histogramme présenté dans la figure IV.26 illustre la fluctuation de la vitesse du son des BHP avant et après l'attaque des mélanges d'acides à une température ambiante de 20C° et aux mélanges d'acides associés aux effets des cycles de gel et de dégel. Une réduction de la vitesse du son a été constatée dans toutes les compositions, avec un taux de diminution maximal observé dans celles contenant du fumé de silice. La diminution de la vitesse du son a été notée comme étant inférieure à celle mesurée à une température ambiante de 20C°.

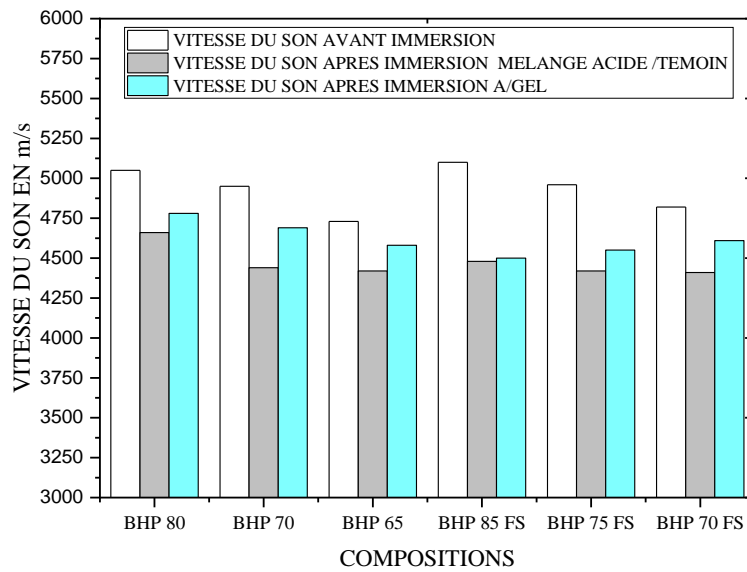


Figure IV.26: Evolution de la vitesse du son avant et après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.

IV.2.3.7 Variation dimensionnelle : selon la figure IV.27 les variations des dimensions longitudinales ont été mesurées à la fin d'essai. Le taux de variation dimensionnelle dans toutes les compositions des BHP a été remarqué faible son intervalle varie entre 0.35%-0.72% les variations des dimensions longitudinales ont été remarqués inférieur à celle mesurée à une température ambiante de 20C°.

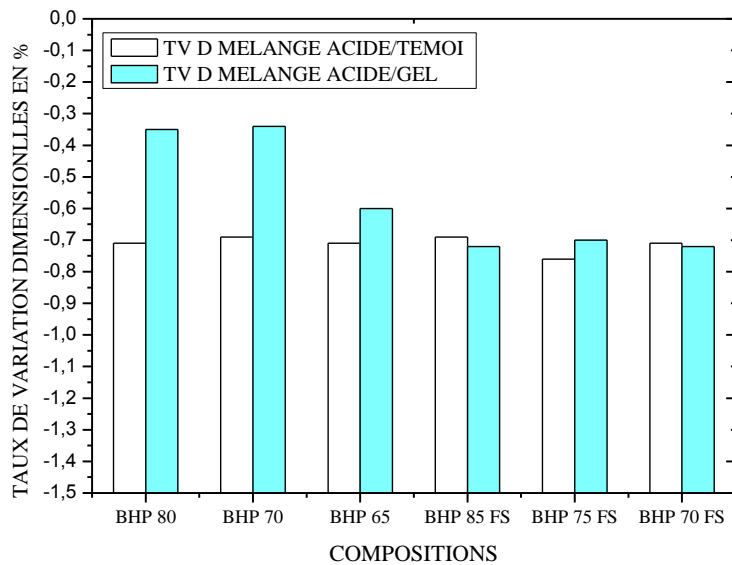


Figure IV.27: Taux de variation dimensionnelle après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel

IV.2.3.8 Résistance mécanique : Les courbes des figures IV.28 et 29 illustrent l'évolution de la résistance mécanique à la compression et à la flexion des échantillons avant leur immersion dans la solution agressive à base des deux types d'acides, ainsi la résistance mécanique à la compression après 120 jours d'immersion des échantillons dans le milieu agressif combinés à l'effet gel/dégel. Les valeurs de résistance mécanique à la compression ont connu une chute notable pour toutes les compositions des BHP. La résistance mécanique à la compression et à la flexion des échantillons testées aux attaques par un mélange d'acides combinés à l'effet de gel/dégel ont été remarquées meilleurs à celles testées à température de 20°C. Ceci peut être expliqué par la diminution de l'acidité de la solution sous l'effet des cycles gel/dégel comparativement aux solutions soumises à une température de 20°C.

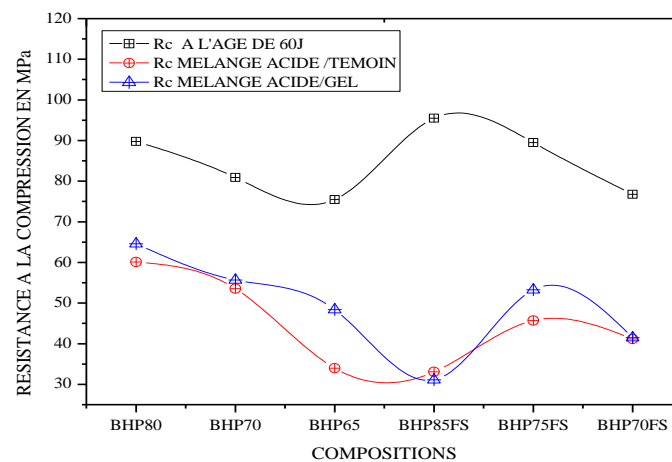


Figure IV.28: Évolution de la résistance à la compression avant et après l'exposition à un mélange d'acides, sous l'influence des cycles de gel et de dégel.

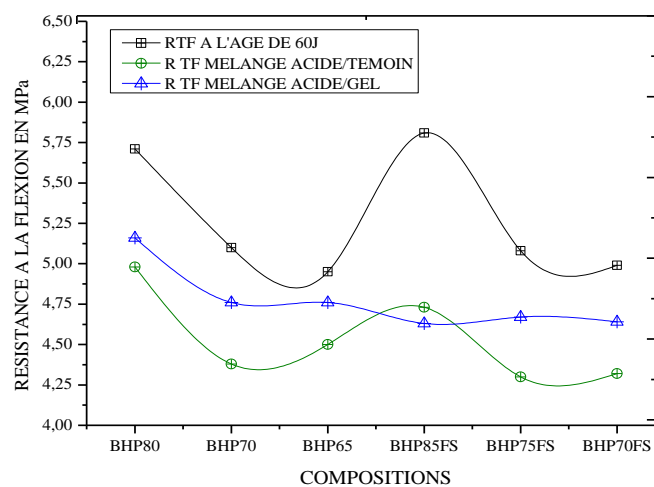


Figure IV.29: Evolution de la résistance mécanique à la flexion avant et après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel.

IV.2.4 Attaque des mélanges d'acides combinés à une température élevée de 50C°:

IV.2.4.1 Evolution de PH : La courbe présentée dans la figure IV.30 illustre l'évolution du pH des diverses solutions résultant des mélanges d'acides avec des échantillons de BHP combinés à une température élevée de 50C°. Les résultats montrent que le PH reste stable et égal à 1 durant les 12 jours premier et atteint après une période d'immersion de 20 jours, la valeur de 4.

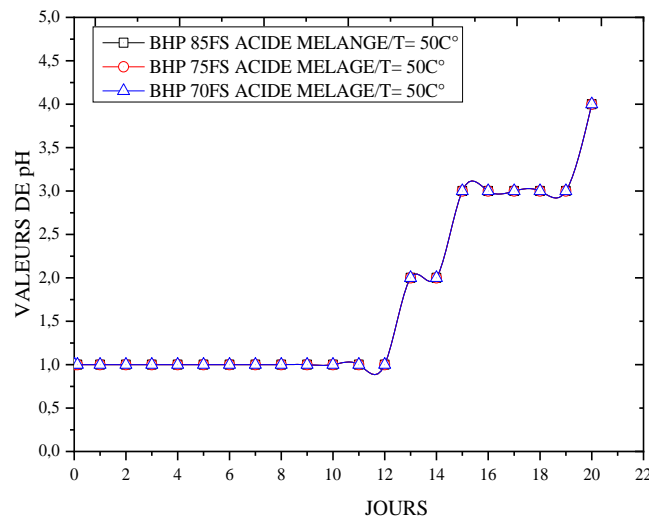


Figure IV.30 : Évolution du pH des solutions de mélanges acides après immersion des éprouvettes en BHP et sous l'influence d'une température élevée de 50°C.

IV.2.4.2 Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure IV.31 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai. Les éprouvettes ont été caractérisées par un aspect blanchâtre et avec une rugosité de surface. À l'intérieur aucune dégradation n'a été observée La dégradation apparaitre uniquement à la surface.

IV.2.4.3 Profondeur altérée : comme dans le cas des protocoles décrites précédemment, la photo de la figure IV.31 aucune modification n'a été observé à l'intérieur de béton, le teste de phénophtaléine montre que les profondeurs altérés ont été observées comme étant supérieures pour les compositions contenant de la fumée de silice. La courbe présentée dans la figure IV.32 illustre l'évolution longitudinale de la profondeur altérée des différentes compositions des BHP testées, l'intervalle de son variation entre 1.3 -2mm.

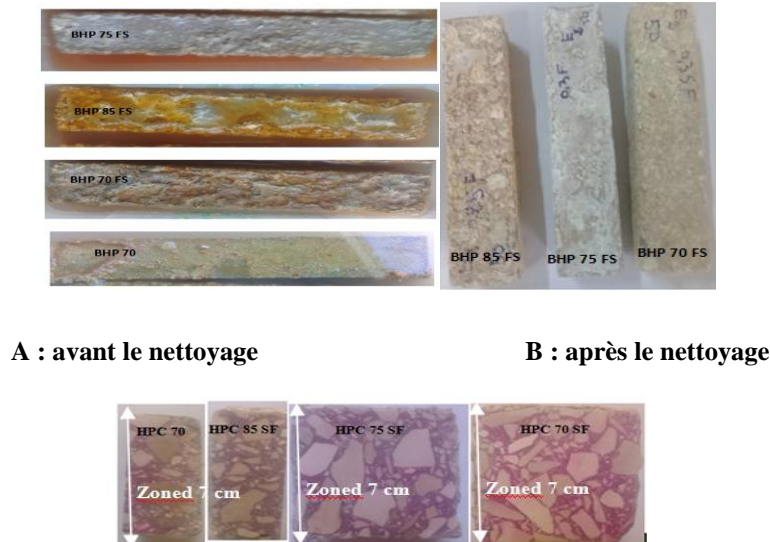


Figure IV.31 : L'aspect des éprouvettes, tant sur le plan extérieur qu'intérieur, après l'exposition à un mélange d'acides suite à leur immersion en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.

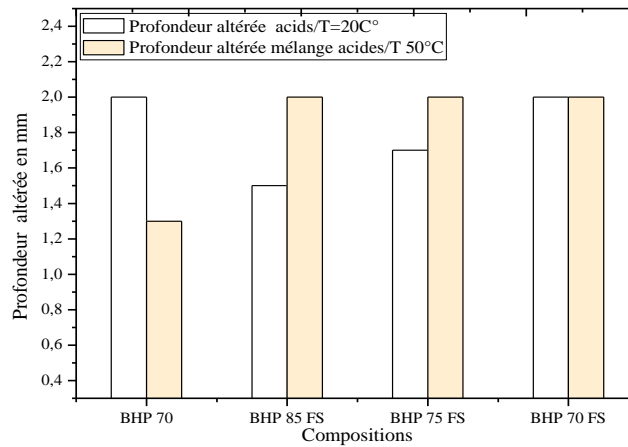


Figure IV.32 : Profondeur altérée après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.

IV.2.4.4 Perte relative de masse : Après une immersion de 120 jours des éprouvettes dans une solution de mélanges d'acides, il a été observé que le taux de variation des masses des échantillons contenant de la fumée de silice était supérieur à celui des échantillons sans ajout de fumée de silice, comme l'illustre l'histogramme de la [figure IV.33](#). De plus, l'évolution des taux de variation des masses se présente comme une fonction décroissante en fonction de l'augmentation du rapport E/L. Les taux de variation des masses des échantillons exposés à une température élevée de 50 °C étaient inférieurs à ceux mesurés à une température ambiante de 20 °C, comme le montre l'histogramme de la [figure IV.34](#).

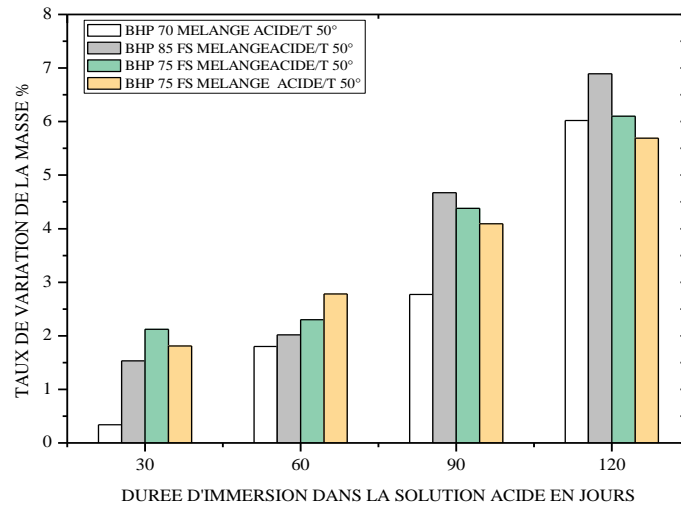


Figure IV.33 : Évolution des pertes relatives de masse suite à l'attaque par un mélange d'acides après immersion des échantillons en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.

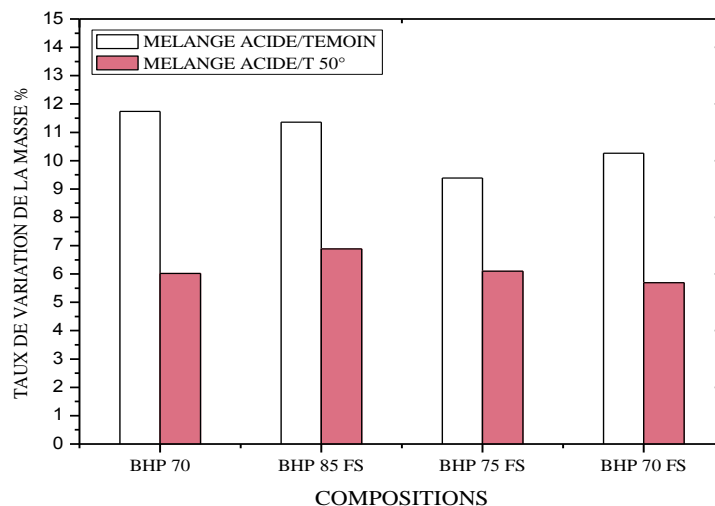


Figure IV.34: Pertes relatives de masse après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.

IV.2.4.5 Porosité accessible à l'eau :

La figure IV.35 présente un histogramme qui regroupe les valeurs de porosité accessible à l'eau pour les différentes compositions de BHP, avant et après l'essai de la résistance chimique aux mélanges d'acides à une température ambiante de 20C° et aux mélanges d'acides combinés à l'effet d'une température élevée de 50C°. Les résultats montrent une élévation des valeurs de porosité a été notée dans toutes les compositions de BHP par rapport à la porosité mesurée avant immersion des éprouvettes dans la solution agressive. Ainsi, le taux

d'augmentation a été observé un peu élevé pour les compositions avec fumé de silice. L'augmentation de la porosité a été remarquée supérieur à celle mesurée à une température ambiante de 20C°.

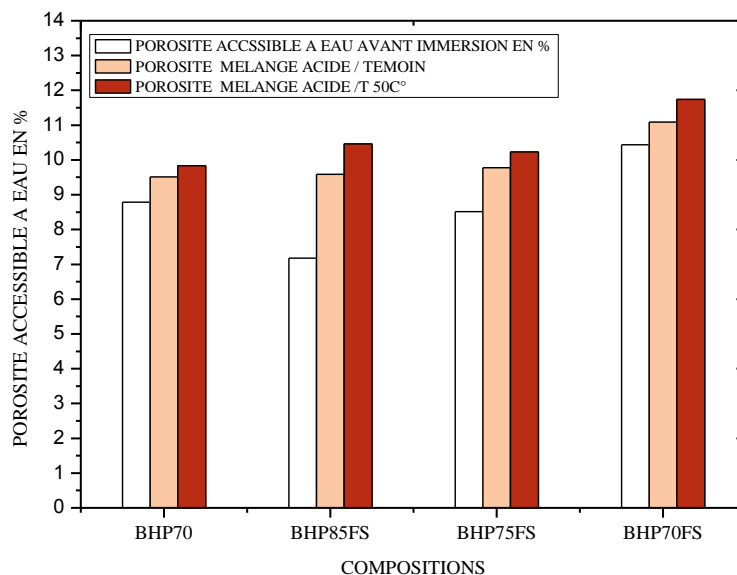


Figure IV.35: Évolution de la porosité accessible à l'eau avant et après l'exposition à un mélange d'acides des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50C°.

IV.2.4.6 Vitesse du son :

L'histogramme présenté dans la figure IV.36 illustre la variation de la vitesse du son des BHP avant et après l'exposition aux mélanges d'acides, à une température ambiante de 20 °C, ainsi qu'aux mélanges d'acides soumis à une température élevée de 50°C. Une réduction de la vitesse du son a été observée dans toutes les compositions, avec un taux de diminution maximal constaté dans celles contenant du fumé de silice. La baisse de la vitesse du son pour les échantillons à base de fumé de silice a été notée comme étant supérieure à celle mesurée à la température ambiante de 20°C.

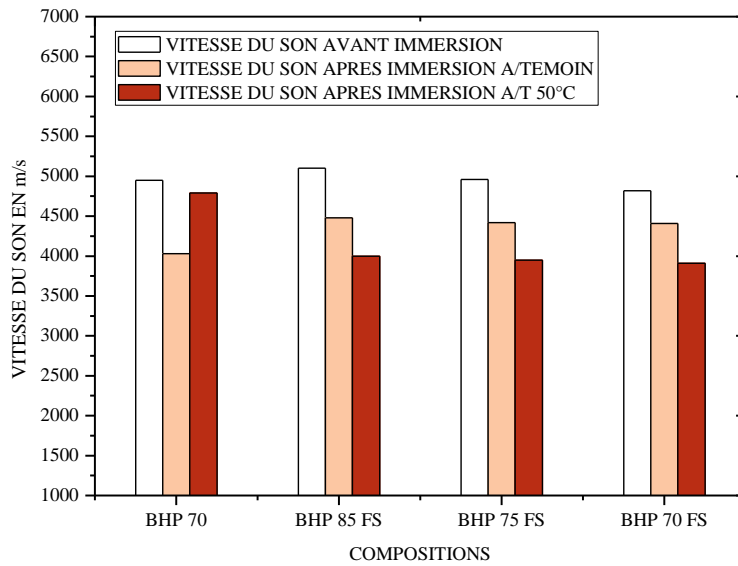


Figure IV.36: Evolution de la vitesse du son avant et après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50°C°.

IV.2.4.7 Variation dimensionnelle :

Selon la [figure IV.37](#) les variations des dimensions longitudinales ont été mesurées à la fin d'essai. Le taux de variation dimensionnelle dans toutes les compositions des BHP a été remarqué faible son intervalle varie entre 0.34%-0.67% les variations des dimensions longitudinales des éprouvettes testées dans une solution agressive de mélange d'acides sous l'effet de température de 50C° ont été remarqués légèrement inférieur à celle mesurée à une température ambiante de 20C°.

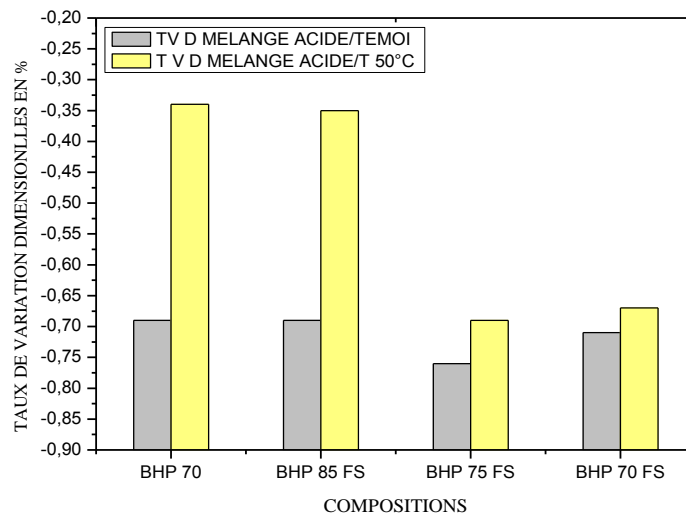


Figure IV.37: Taux de variation dimensionnelle après l'attaque de mélange d'acides après immersions des éprouvettes en BHP et sous l'effet une température élevée de 50°C°.

IV.2.4.8 Résistance mécanique : les courbes des figures IV.38 et 39 Démontrent l'évolution de la résistance mécanique à la compression et à la flexion des échantillons avant d'être immergés dans la solution agressive à base des deux types d'acides, ainsi la résistance mécanique à la compression après 120 jours d'immersion des échantillons dans le milieu agressif sous l'effet d'une température de 50 °C. Une diminution significative des valeurs de résistance mécanique à la compression pour toutes les compositions des BHP. La réduction maximale a été constatée dans les compositions contenant de la fumée de silice.

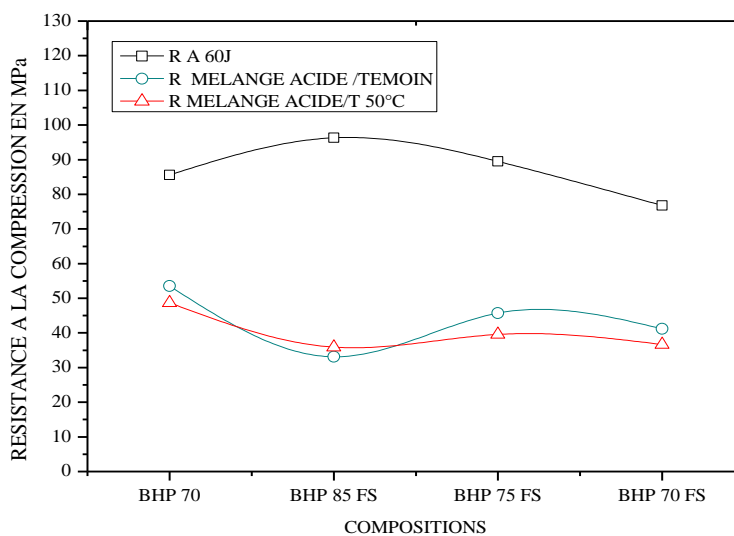


Figure IV.38: Évolution de la résistance à la compression des échantillons avant et après leur exposition à un mélange d'acides et sous l'effet une température élevée de 50°C°.

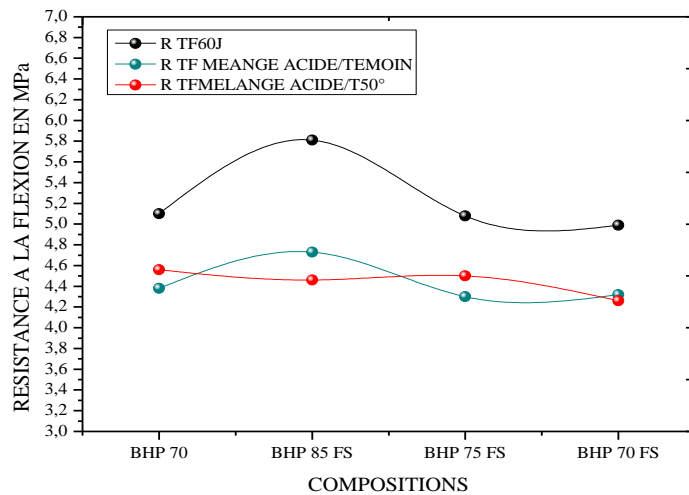


Figure IV.39: Evolution de la résistance mécanique à la flexion des échantillons avant et après leur exposition à un mélange d'acides et sous l'effet d'une température élevée de 50°C°.

IV.2.5 Etude comparative

IV.2.5.1 Evolution de pH : L'étude de l'évolution du pH des différentes solutions, et selon les protocoles utilisés, démontre une augmentation de l'acidité en fonction de la température, comme le présente la figure IV.40. Pour la solution à base de mélange d'acides, le pH atteint 4 après 19 jours à 50 °C, et après 15 jours à 20 °C. En ce qui concerne les solutions soumises à des cycles de gel et de dégel, le pH atteint également 4 après 12 jours d'immersion.

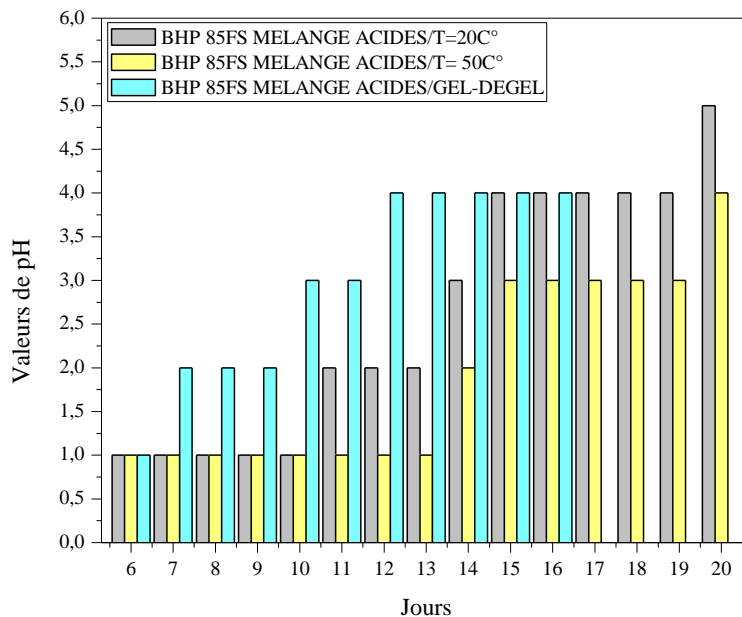


Figure IV.40: Evolution de pH des solutions acides après l'immersion des éprouvettes en BHP, selon les protocoles adoptés.

IV.2.5.2 Perte relative de masse : Conformément aux résultats affichés dans l'histogramme de la figure IV.41, les mesures des pertes relatives de masse sous l'effet de haute températures de 50°C et le mélanges d'acides sous l'effet des cycles gel/dégel, on constate que l'application de la combinaison des conditions climatiques aux acides sur les BHP n'a pas un effet significatives sur les pertes relatives de masses, dont le taux des pertes est presque identiques et ils n'excèdent pas le 8% après 120 jours d'immersion dans la solution d'acide. L'agression des BHP par un mélange d'acides à une température de 20°C entraîne des pertes relatives de masse d'environ 11 %. Ce phénomène peut être attribué à la dissolution de la couche superficielle des éprouvettes, ce qui se traduit par un taux légèrement supérieur de perte de masse.

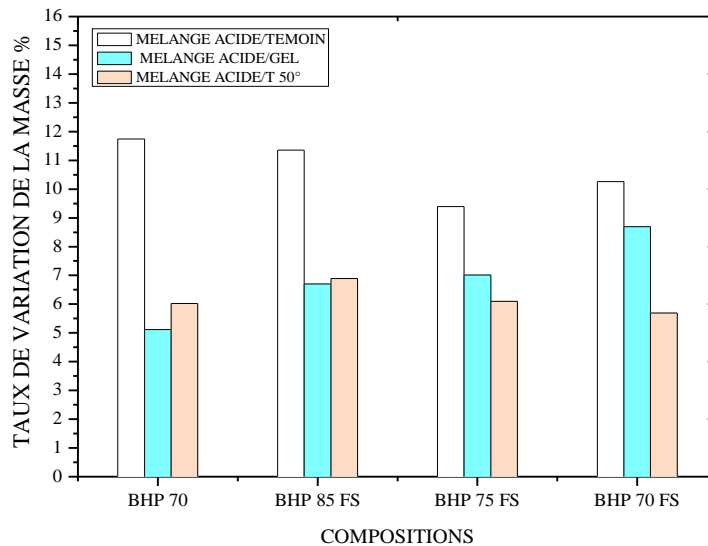


Figure IV.41: Pertes relatives de masse sous l'effet des conditions climatiques.

IV.2.5.3 Porosité accessible à l'eau : une légère élévation de la porosité accessible à l'eau des échantillons a été notée d'après les résultats obtenus après l'attaque de mélange d'acides sous l'effet de haute température 50°C, sous l'influence d'une température de 20 °C, l'application des cycles de gel et de dégel, comme illustré dans la figure IV.42, on observe une augmentation de la porosité des échantillons en BHP pour le protocole mélange d'acides sous l'effet d'une température élevée de 50°C est observée un peu supérieur comparativement aux autres protocoles. L'augmentation de la porosité maximale a été remarqué pour la composition BHP85 FS sa valeur atteint le 10.46%. L'évolution de la porosité accessible à l'eau, sous l'influence d'une température de 20 °C et des cycles de gel et de dégel, a été observée comme étant similaire.

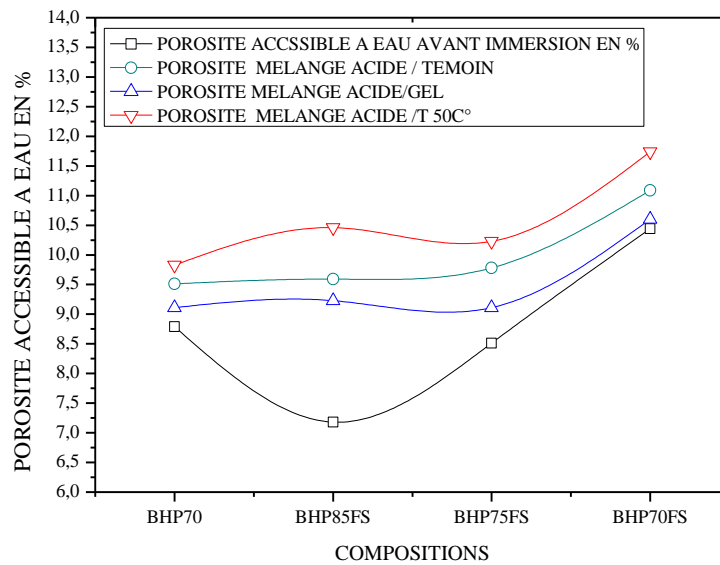


Figure IV.42: Variation de la porosité sous l'effet des conditions climatiques

IV.2.5.3 Résistance mécanique : Les figures IV.43 et 44 représentent les courbes d'évolution de la résistance mécanique à la compression et à la flexion des éprouvettes, après que les échantillons aient été immergés pendant 120 jours dans le milieu agressif composé de mélange d'acides combinés aux effets de température 20°C et 50C°, ainsi combiné aux effets des cycles gel/dégel.

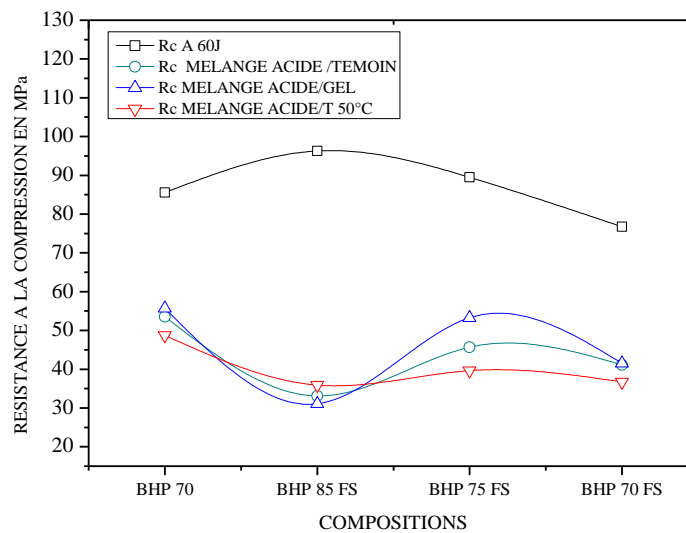


Figure IV.43: Evolution de la résistance mécanique à la compression sous l'effet de conditions climatiques utilisées.

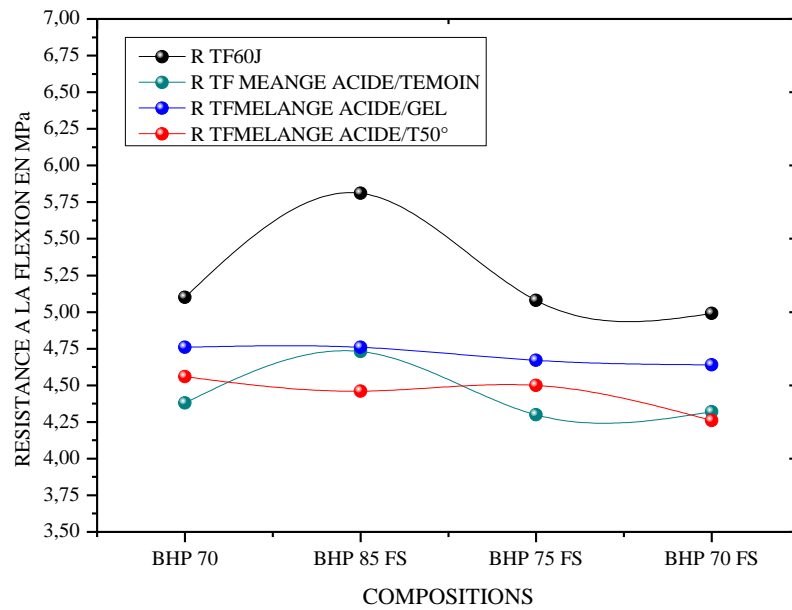


Figure IV.44: Variation résistance mécanique à la flexion sous l'effet de conditions climatiques utilisées.

Une réduction significative a été constatée dans les valeurs de résistance mécanique à la compression de toutes les compositions des BHP examinées. Le taux de diminution le plus élevé a été noté dans les compositions contenant de la fumée de silice, sous l'influence d'une température élevée de 50 °C.

Bien que les taux de variation des masses soient inférieurs à 10 % dans la plupart des compositions en BHP testées, une faible augmentation de la porosité accessible à l'eau a été notée, et le cœur des échantillons reste sain dans toutes les formulations de BHP. On observe une réduction considérable de la résistance mécanique à la compression est constatée, avec un taux de diminution qui fluctue entre 28%-67% voir [figure IV.45](#). Ceci peut être expliqué par la fragilité de la zone superficielle des éprouvettes qui a été caractérisée par un aspect extérieur poreux très fragile, ainsi la cristallisation des sels résultant par les différentes réactions chimiques tel que le gypse et l'acétate de calcium, favorise la propagation des fissures, entraînant une rupture rapide du matériau. Ainsi, aucune relation n'a été identifiée entre les taux de pertes de masse relatifs et la résistance mécanique à la compression et à la flexion.

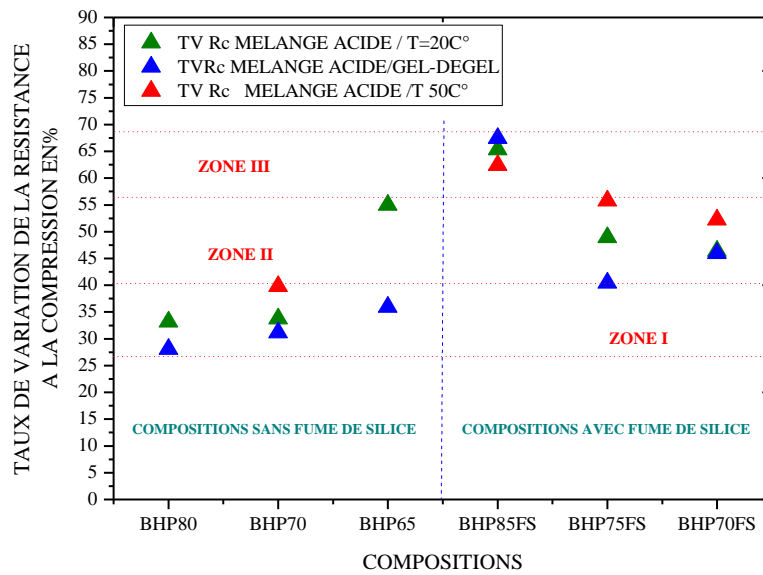
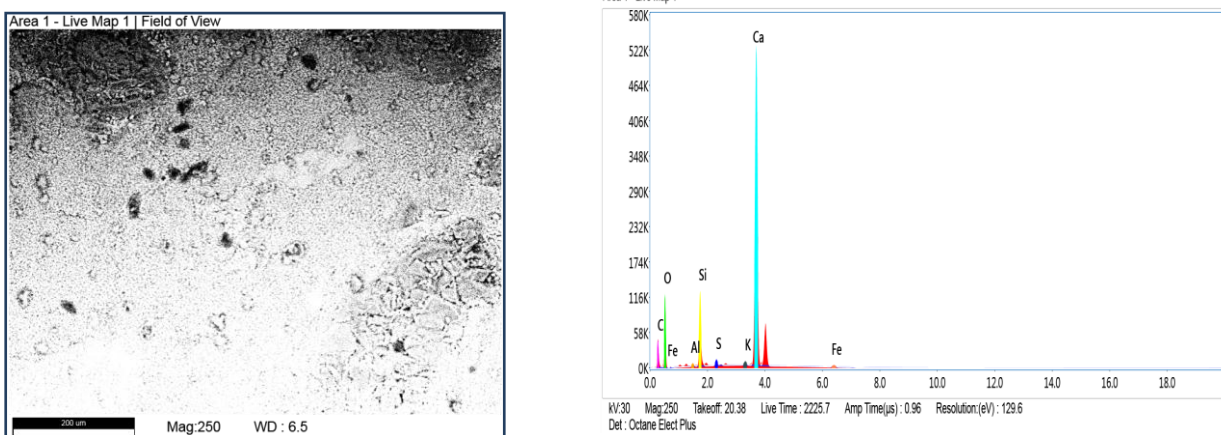


Figure IV.45: Taux de variation de la résistance mécanique à la compression sous l'effet de conditions climatiques utilisées.

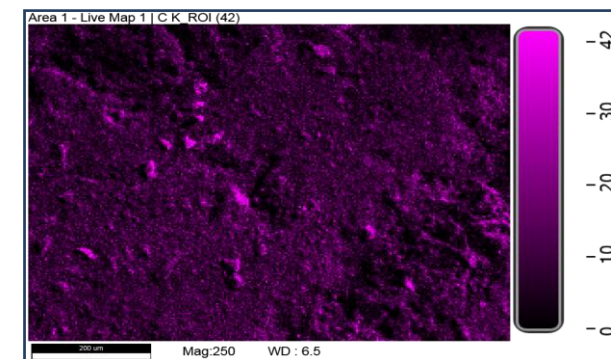
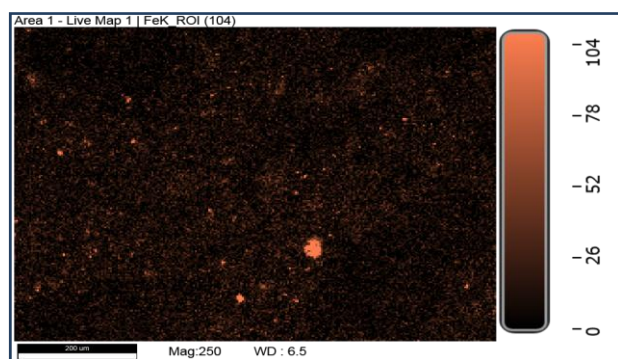
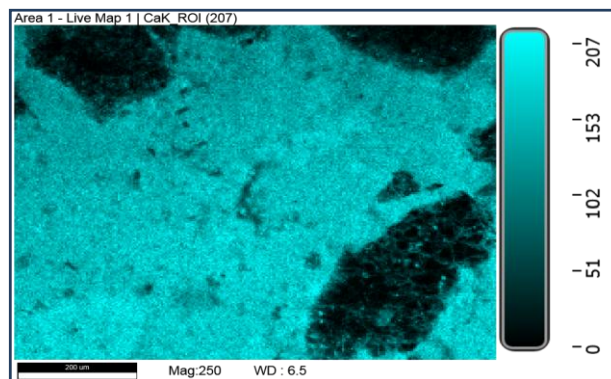
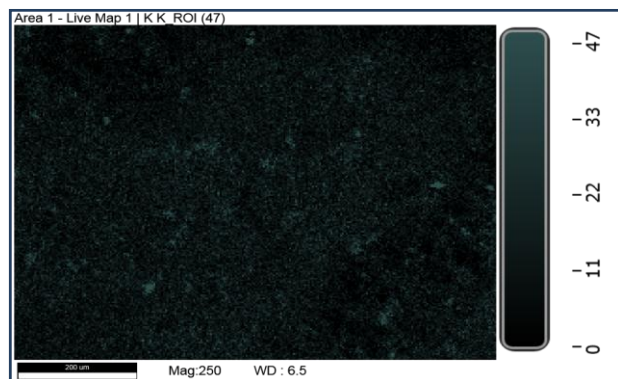
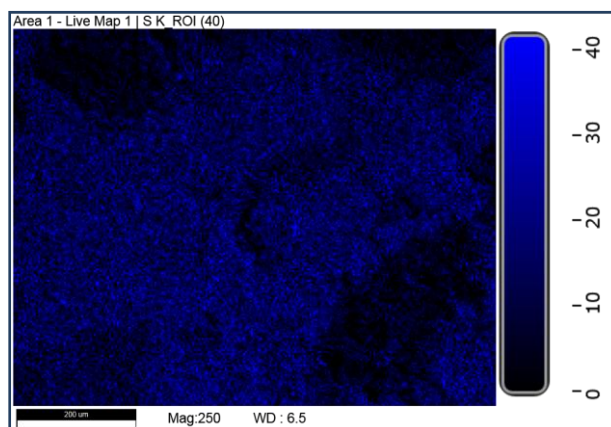
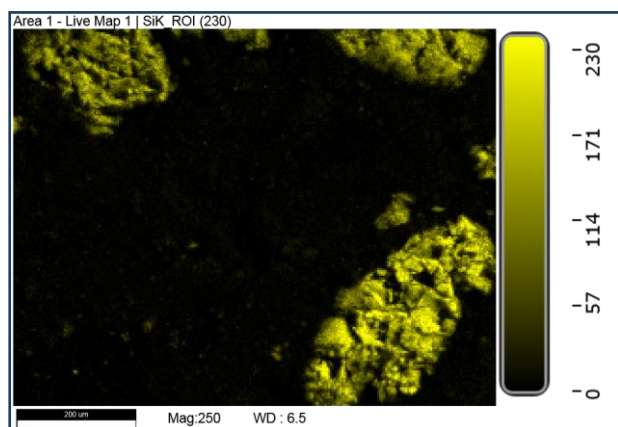
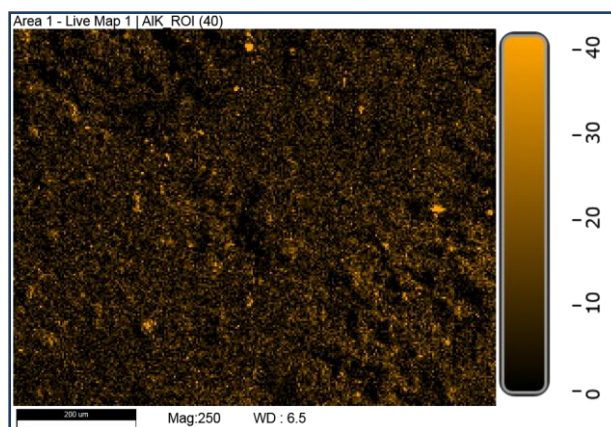
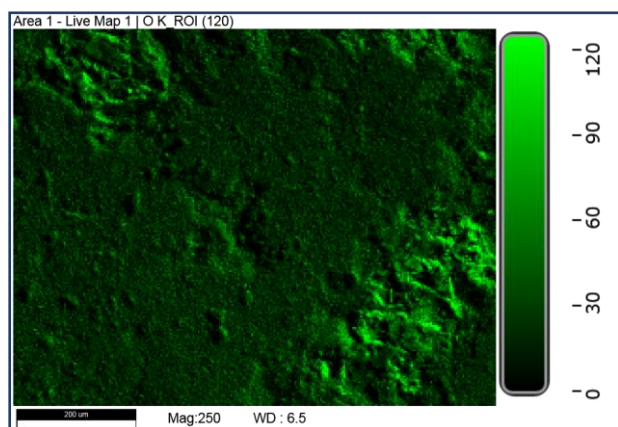
IV.2.6 Analyses microstructures : Des analyses microstructures par MEB/EDS et par DRX ont été effectués à la fin des essais d'attaques par les acides afin de vérifier tous types de modification au sein du matériau, et ce à l'échelle microscopique. Nous avons choisi la composition BHP70FS pour notre étude microscopique. Les résultats obtenus sont comme suit :

IV.2.6.1 Analyse par MEB/EDS et DRX après l'attaque du béton par l'acide acétique :

La figure IV.46 présente le spectre atomique et la cartographie de l'image de BHP70FS attaqué par l'acide acétique. L'image MEB montre que l'échantillon reste toujours sain avec une présence très restreinte de microfissures et de petits pores, avec des longueurs de l'ordre de quelques nanomètres.



CHAPITRE IV : DURABILITE AUX ACIDES



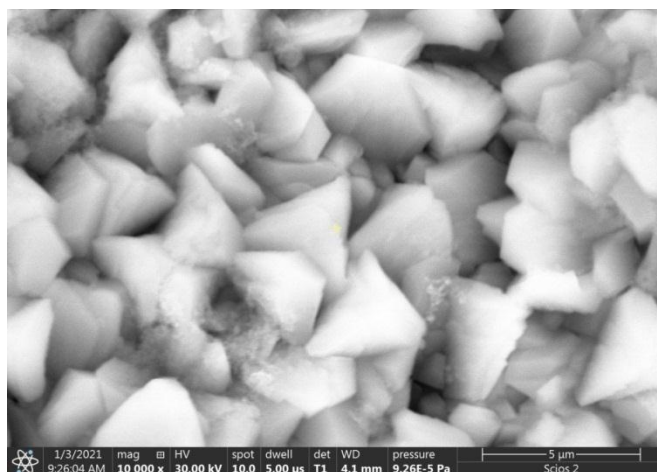


Figure IV.46: Observation au **MEB** accompagné par des analyses par **EDS** pour l'échantillon **BHP 70FS** a été exposé à une solution contenant 5 % d'acide acétique pendant une période de quatre mois.

Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
C K	6.77	11.44	10.76	42.54	0.8880	0.0381	1.0000
O K	52.32	66.40	10.40	367.87	0.8987	0.0326	1.0000
Al K	0.44	0.33	8.88	24.63	0.9184	0.2700	1.0126
Si K	6.06	4.38	6.92	486.88	0.9218	0.3904	1.0157
S K	0.51	0.32	5.68	46.16	0.9279	0.5693	1.0408
K K	0.33	0.17	4.56	33.86	0.9363	0.8054	1.1480
Ca K	33.15	16.80	2.31	2739.66	0.9388	0.8498	1.0114
Fe K	0.43	0.16	3.78	23.53	0.9527	0.8890	1.0505

D'après le spectre atomique **EDS** il a été remarqué que le **BHP70FS** contient des pics de **Ca**, **O**, et **C** qui sont les éléments principales dans la composition des hydrates et de l'acétate de calcium est principalement le résultat de la réaction de la portlandite, de la calcite avec l'acide acétique. Le pic de Ca a été observé plus élevé comparativement au Si, ceci est expliqué par l'utilisation de sable calcaire qui contient de 10% des fines $\leq 80\mu\text{m}$. Une autre image **MEB** plus de grossissement X10 000 a été effectuée sur le même échantillon. La **figure IV.47** montre une cristallisation d'une texture dense régulière en feuilles avec une très peu cristallisation d'un gel. Vu que l'analyse par **EDS** montre la richesse de l'échantillon par le calcium et un faible pourcentage en silicium et selon la forme de la majorité de ces cristaux hexagonales ; nous pensons qu'il s'agit de la portlandite qui se cristallise accompagnée d'une très faible proportion d'acétate de calcium, qui se forme dans les pores. Une analyse par

diffraction des rayons **X** a été réalisée sur un échantillon broyé afin de confirmer les résultats obtenus par la spectroscopie **EDS**. La figure IV.47 présente le spectre de **BHP70FS** obtenus par **DRX**, selon les résultats les composants détectés par DRX sont la calcite **CaCO₃**, le silicium **SiO₂** et le silicate de calcium **CaSiO₃**. L'acétate de calcium est non détecté dans cette analyse, ceci peut être expliqué par sa faible proportion grâce à sa forte solubilité dans l'eau.

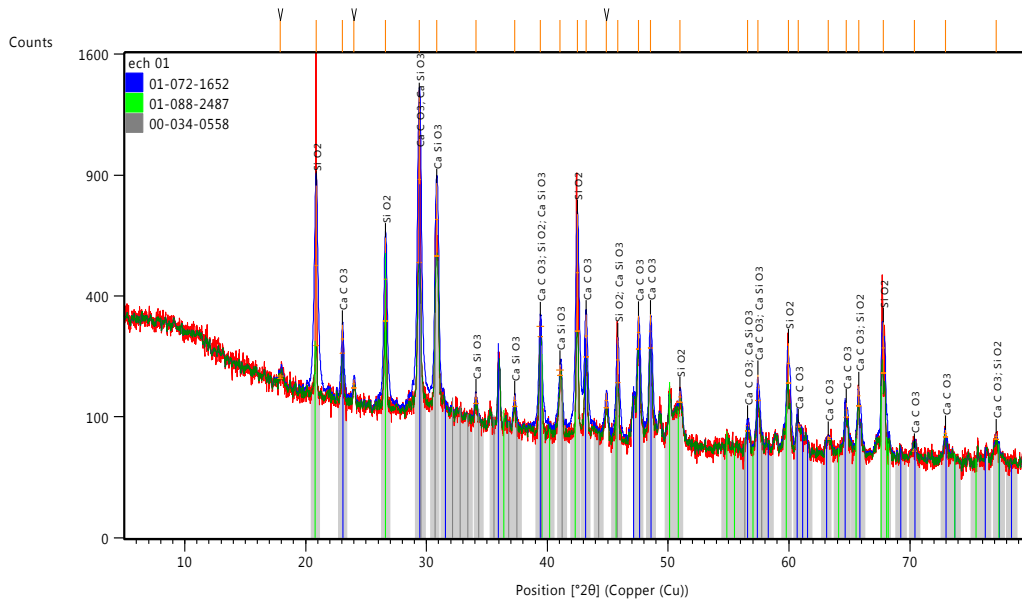
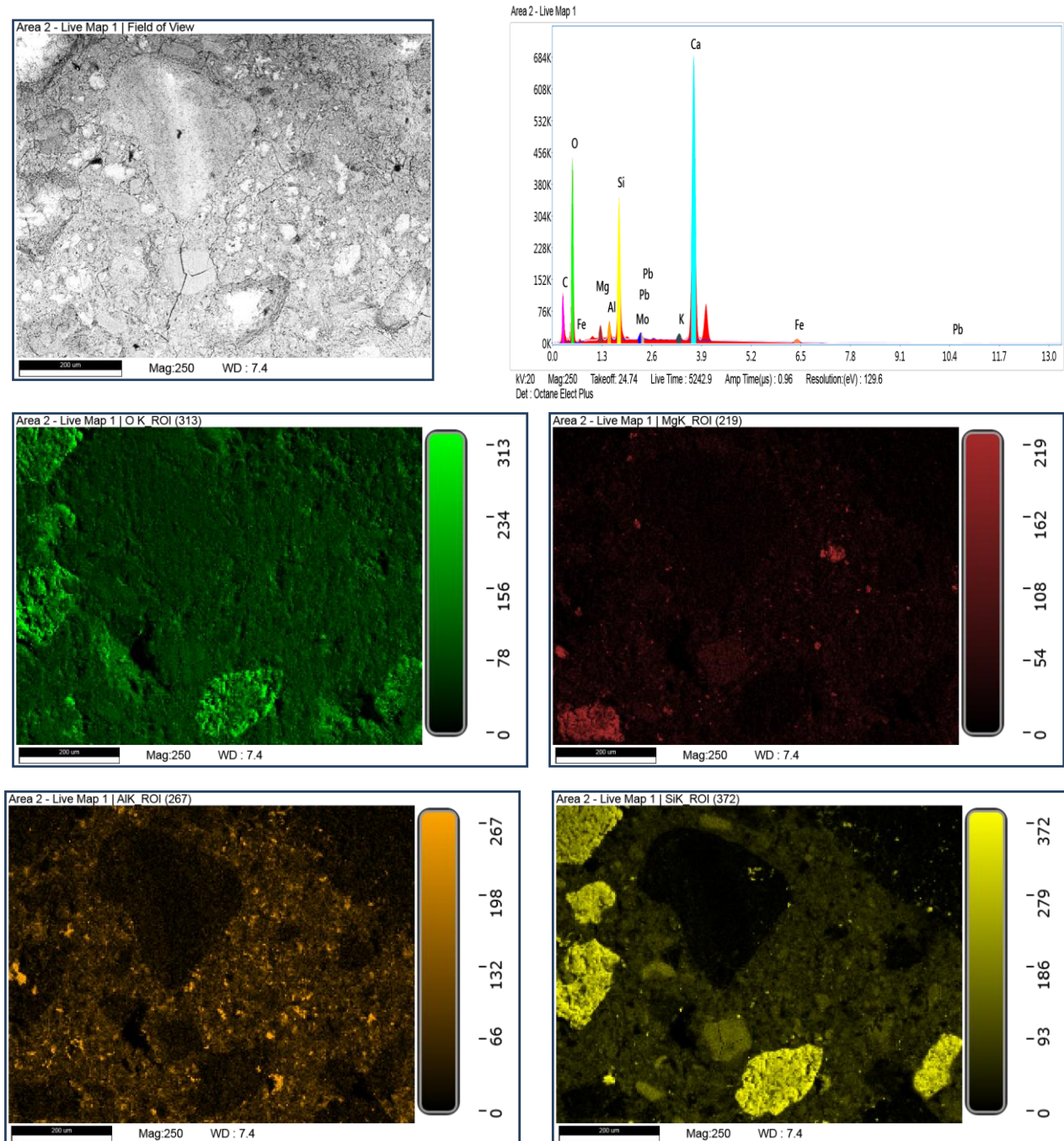


Figure IV.47: Observation au **MEB** et **DRX** pour l'échantillon **BHP 70FS** après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide acétique.

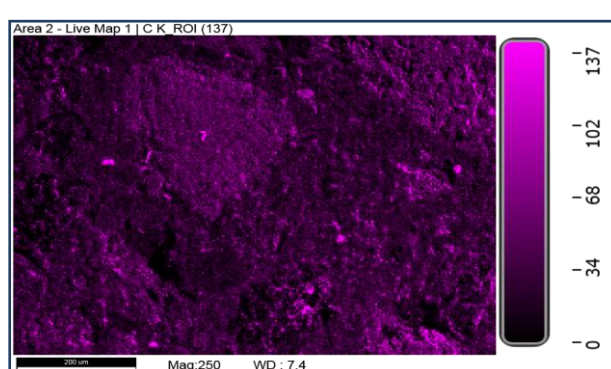
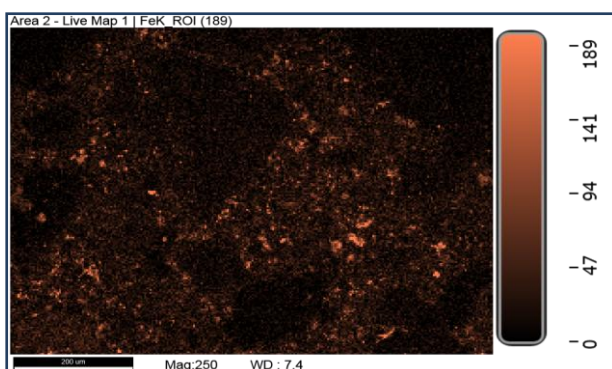
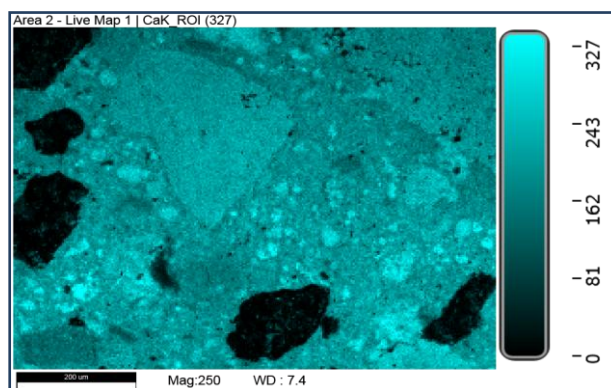
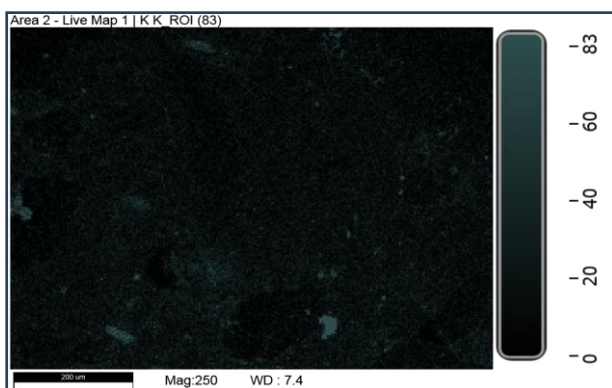
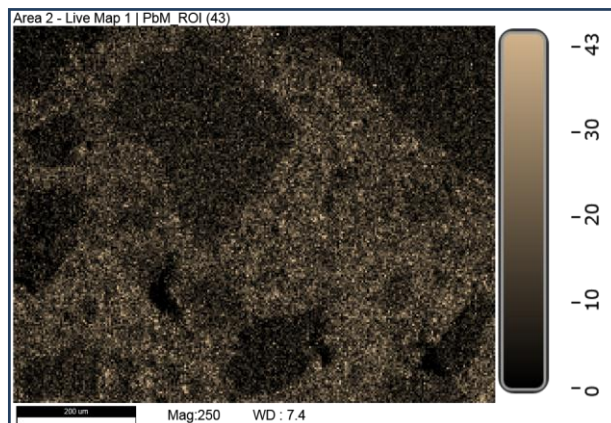
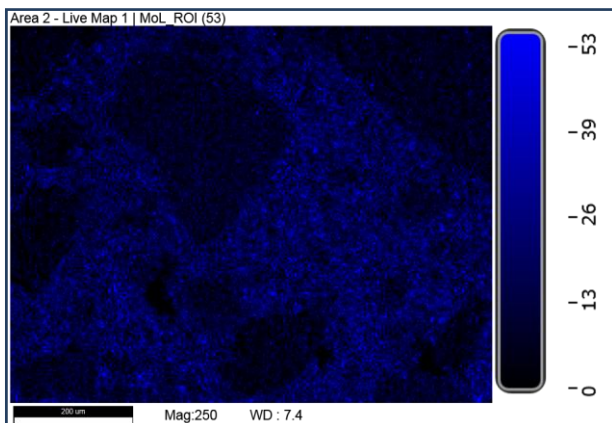
IV.2.6.2 Analyse par MEB/EDS et DRX après l'attaque du béton par l'acide sulfurique :

La [figure IV.48](#) présente le spectre atomique et la cartographie de l'image de BHP70FS attaqué par l'acide sulfurique. L'image **MEB** indique la présence de quelques microfissures allongées au niveau de la pâte et des granulats calcaires. Ces microfissures sont mesurées à environ 600 micromètres de longueur. L'analyse **EDS** confirme la présence de pics de **Ca**, **O**, **Si**, **Al** et **C** qui sont les éléments principaux dans la composition des produits de l'hydratation. L'absence de soufre S a été remarquée dans l'analyse par **EDS**. Le **S** est un élément principal dans la composition de l'Ettringite et gypse. Par contre la deuxième image de **MEB** plus de grossissement **X6500** présentée dans la [figure IV.48](#) montre la cristallisation des sels au sein de l'échantillon qui nous pensons que est le sulfate de calcium **CaSO₄·2H₂O** (gypse). A cette

effet, l'analyse par **DRX** a été effectuée pour confirmer les résultats ; et effectivement selon le spectre présenté dans la **figure IV.49**, l'analyse par diffraction des rayons **X** détecte la formation cristalline du sulfate de calcium **CaSO₄·2H₂O** (gypse) et Calcium- Aluminum – Silicate- Hydrate (gismondine) **Ca Al₂ Si₂ O₈ ·4 H₂O** **F. Stoppa [72]** au sein de matériau.



CHAPITRE IV : DURABILITE AUX ACIDES



Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
C K	0.97	1.74	11.66	7.93	0.8853	0.0751	1.0000
O K	52.50	70.93	10.20	565.24	0.8973	0.0778	1.0000
Mg K	1.42	1.26	7.80	63.85	0.9154	0.3381	1.0061
Al K	1.32	1.06	6.57	76.54	0.9194	0.4670	1.0102
Si K	8.11	6.24	5.25	567.28	0.9232	0.5852	1.0107
K K	0.53	0.29	3.46	29.80	0.9398	0.8844	1.0956
Ca K	33.27	17.94	2.10	1504.93	0.9428	0.9115	1.0118
Fe K	0.96	0.37	2.98	23.09	0.9596	0.9448	1.0507
Mo L	0.53	0.12	5.49	16.94	0.9312	0.7254	1.0148
Pb M	0.39	0.04	6.86	10.53	0.9317	0.7522	1.1000

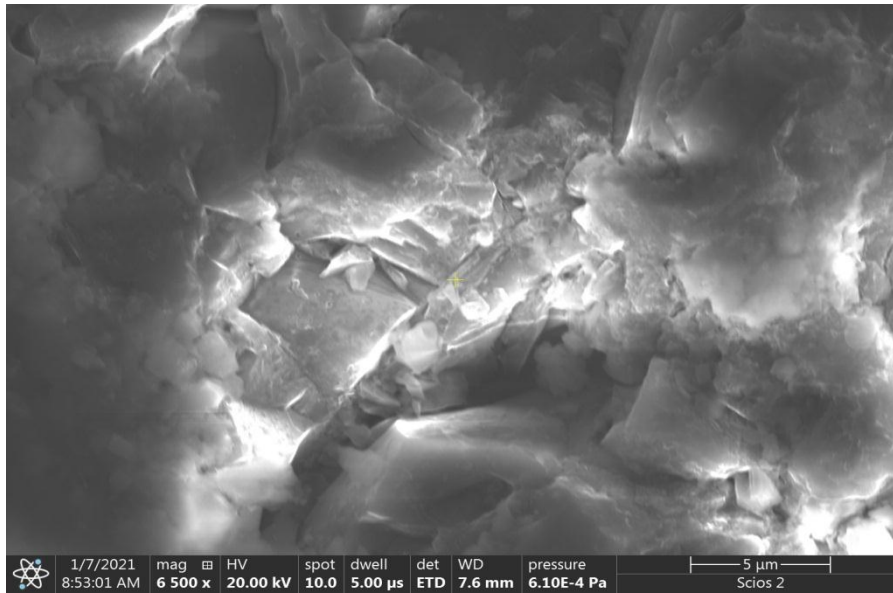


Figure IV.48: Observation au **MEB** accompagnée par des analyses par **EDS** pour l'échantillon **BHP70FS** après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide sulfurique.

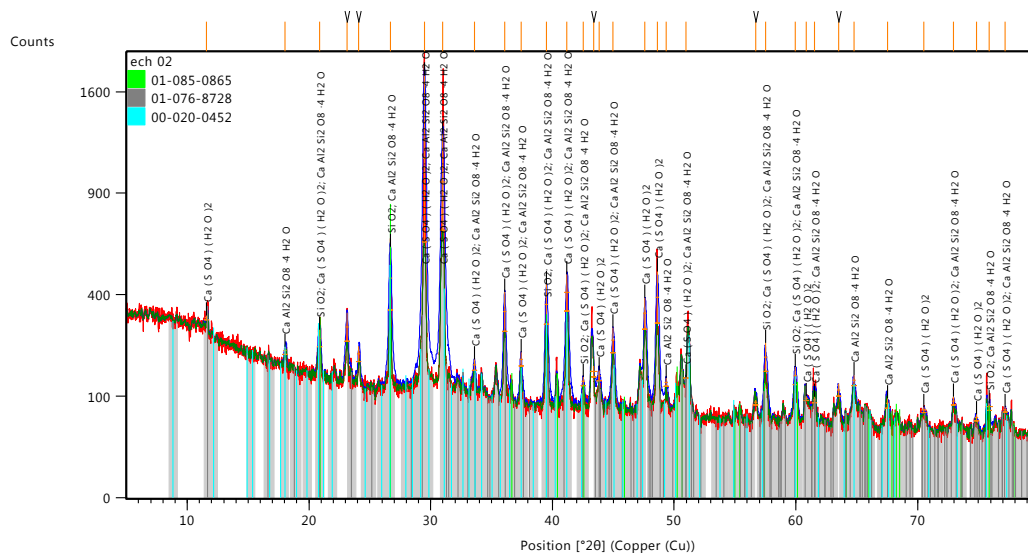
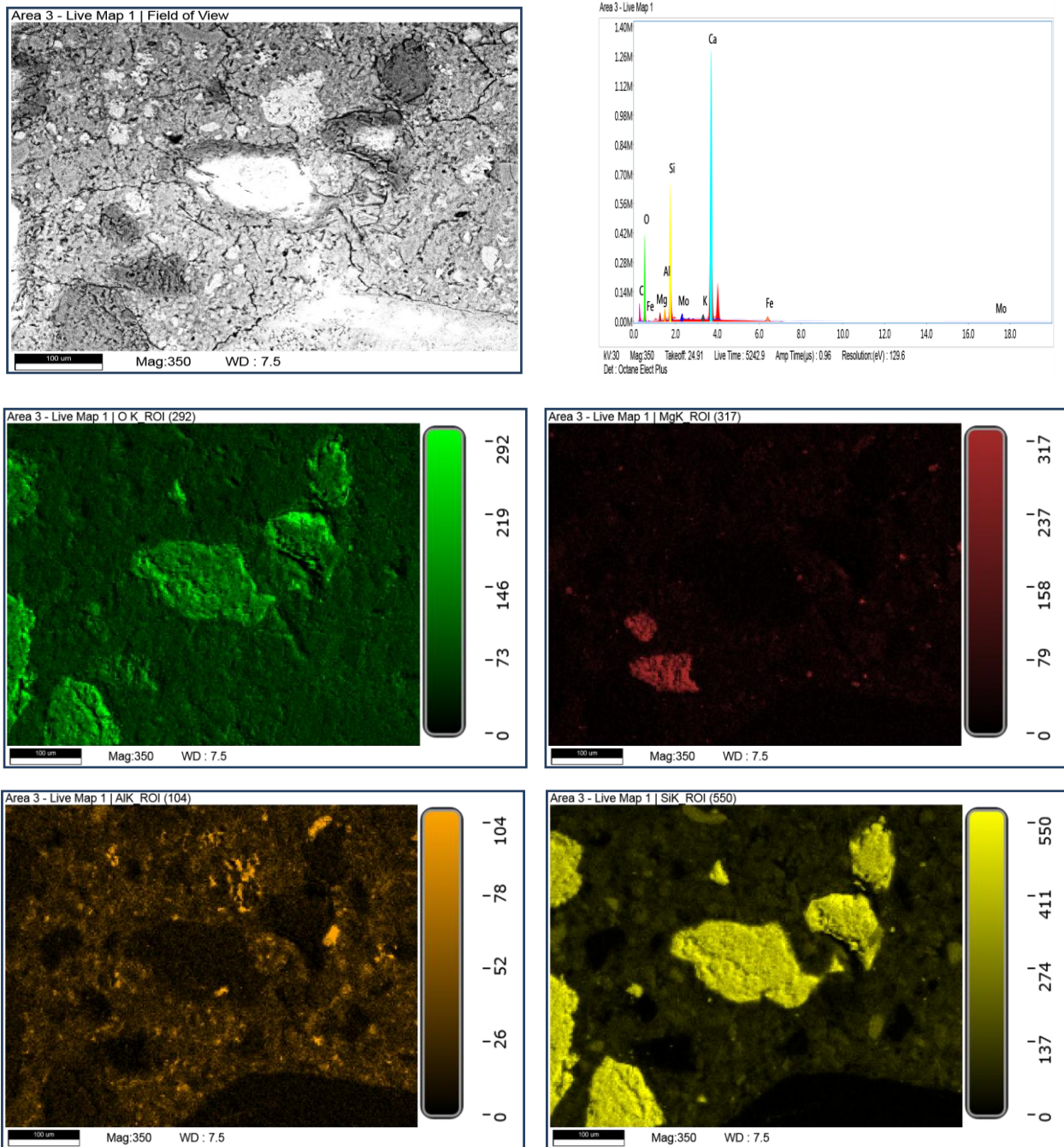


Figure IV.49: Analyse par **DRX** sur l'échantillon **BHP 70FS** après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide sulfurique.

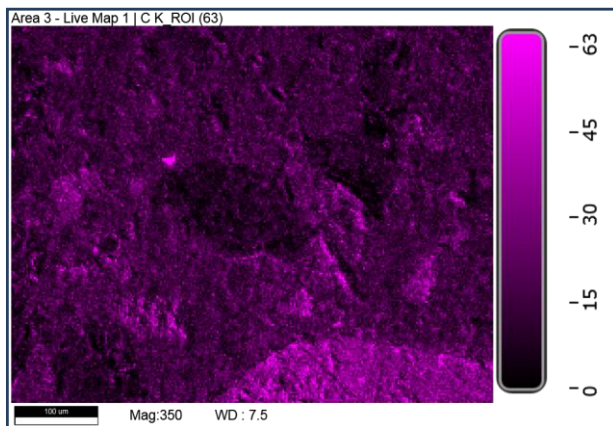
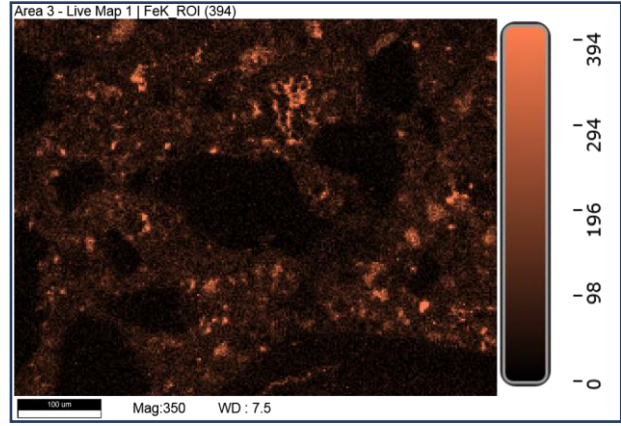
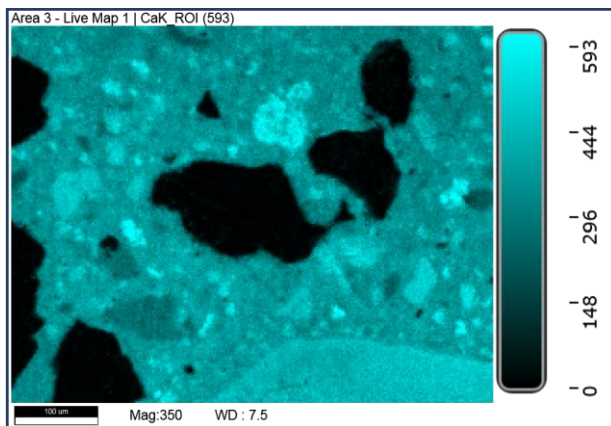
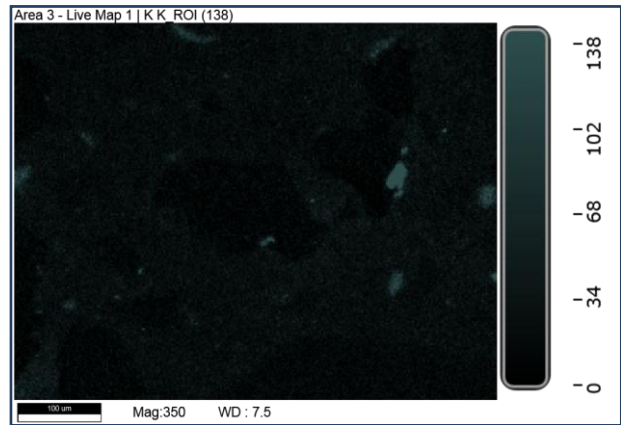
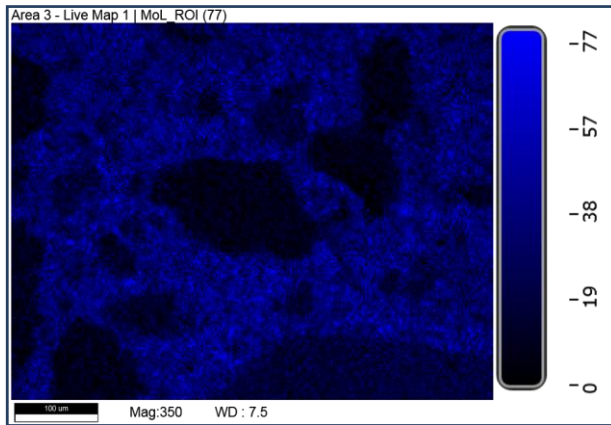
IV.2.6.3 Analyse par MEB/EDS et DRX après l'attaque du béton par un mélange de l'acide acétique et sulfurique sous l'effet d'une température de 20C° :

Dans la figure IV.50, on peut observer le spectre atomique accompagné de la cartographie de l'image de **BHP70FS** attaqué par un mélange des deux acides acétique et sulfurique. La représentation **MEB** indique la présence d'un champ significatif de microfissures au sein de la pâte, dans les granulats calcaires et à l'interface entre la pâte et les granulats siliceux. Les longueurs des microfissures. L'analyse **EDS** montre que l'échantillon contient des pics de **Ca**, **O**, **Si**, **Al** et **C** qui représentent les éléments principaux dans la composition des produits

d'hydratation. De plus, tout comme lors de l'attaque unique par l'acide sulfurique, le soufre S est absent dans l'analyse par EDS. L'image par MEB plus de grossissement X8000 présentée dans la figure IV 50 montre aussi une cristallisation de gel au sein de l'échantillon qui nous pensons que sont de gypse et l'acétate de calcium. Tandis, L'analyse par DRX figure IV.51 détecte la cristallisation de sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gypse) et Calcium- Aluminium – Silicate- Hydrate (gismondine) $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ F. Stoppa [72] au sein de l'échantillon béton broyé. Ceci peut être expliqué par la cristallisation des nouveaux sels dans des points très limités et avec des quantités très faible.



CHAPITRE IV : DURABILITE AUX ACIDES



Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
C K	1.59	2.78	11.53	9.84	0.8859	0.0302	1.0000
O K	53.83	70.83	10.32	537.03	0.8967	0.0371	1.0000
Mg K	1.38	1.20	9.19	64.56	0.9131	0.1695	1.0074
Al K	1.35	1.05	8.22	93.76	0.9167	0.2668	1.0125
Si K	11.28	8.45	6.98	1092.30	0.9201	0.3784	1.0117
K K	0.40	0.22	4.19	47.29	0.9348	0.7672	1.1053
Ca K	28.52	14.98	2.63	2835.59	0.9374	0.8184	1.0124
Fe K	0.84	0.32	2.55	57.05	0.9515	0.8924	1.0527
Mo L	0.82	0.18	6.21	41.55	0.9273	0.5166	1.0130

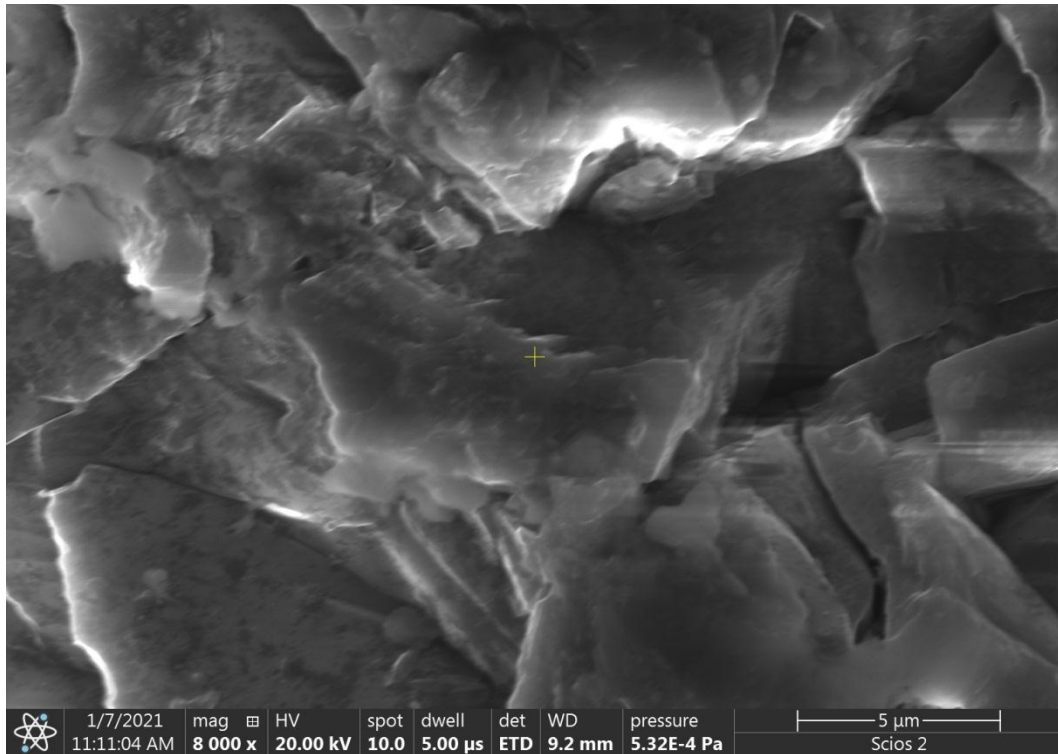


Figure IV.50 : Observation au **MEB** accompagné par des analyses par **EDS** pour l'échantillon **BHP 70FS** qui a été soumis à une immersion de quatre mois dans une solution composée de 5 % d'acide acétique et de 5 % d'acide sulfurique, à une température de 20 °C.

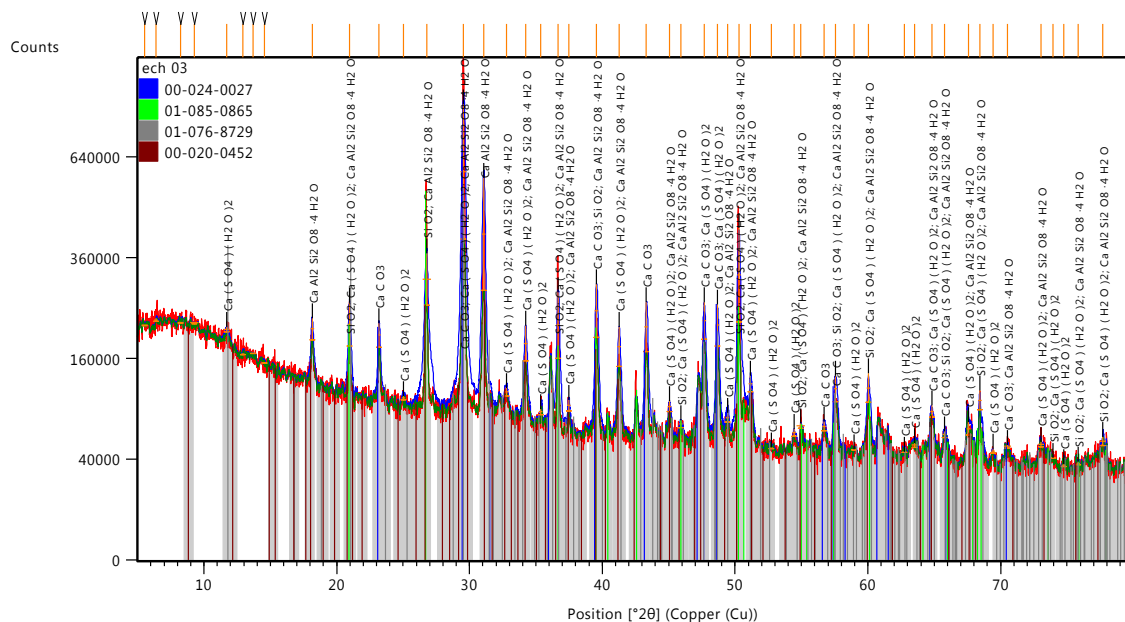
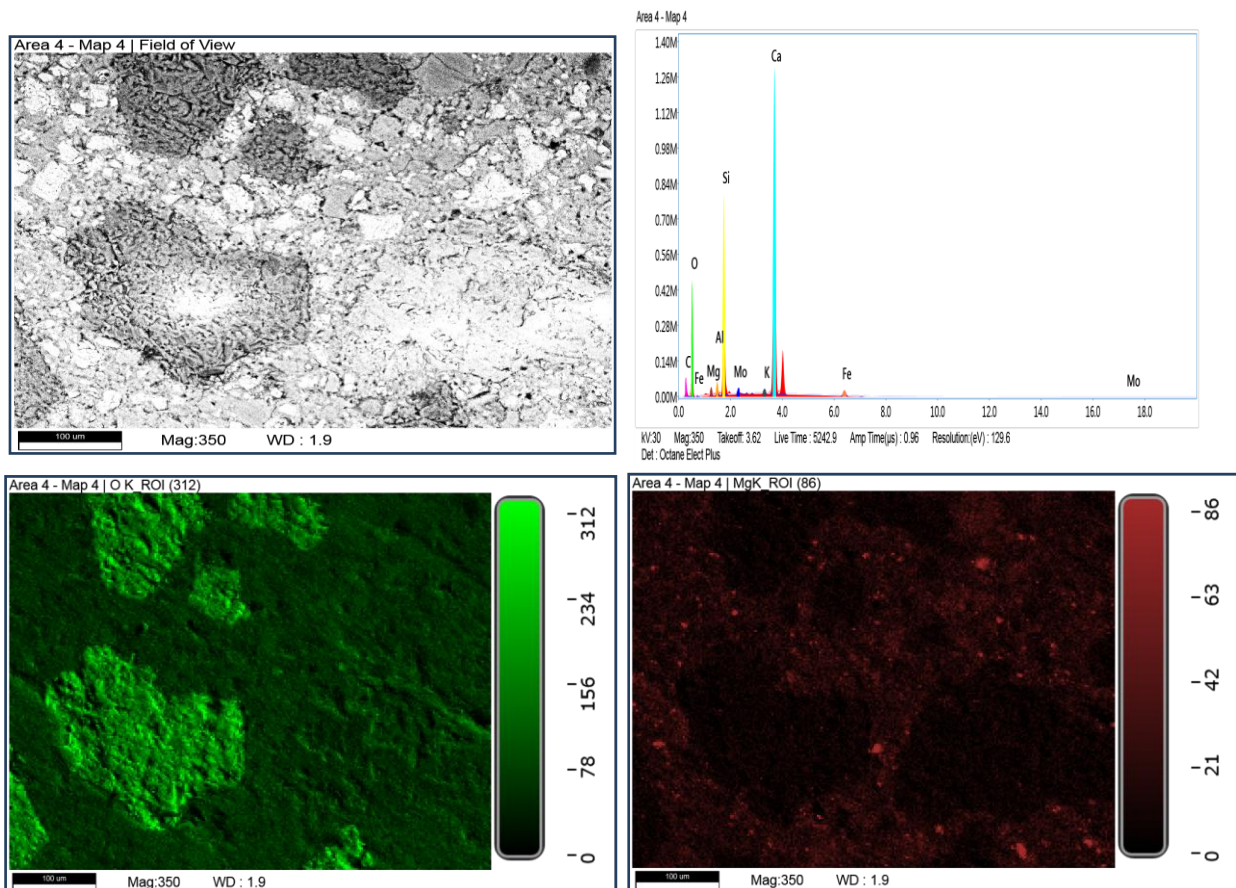


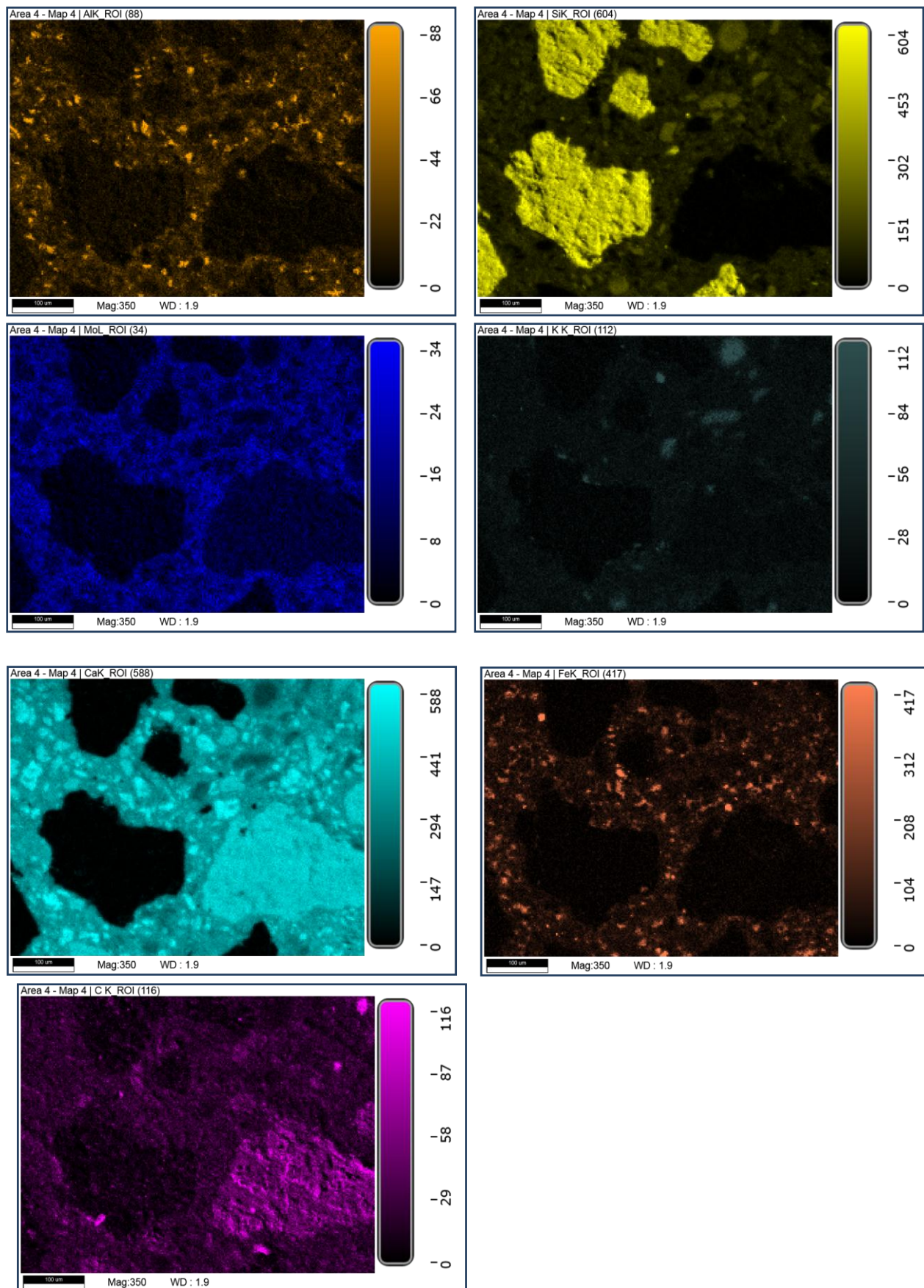
Figure IV.51 : Analyse par **DRX** sur l'échantillon **BHP70FS** qui a été soumis à une immersion de quatre mois dans une solution composée de 5 % d'acide acétique et de 5 % d'acide sulfurique, à une température de 20 °C.

IV.2.6.4 Analyse par MEB/EDS et DRX après l'attaque du béton par un mélange de l'acide acétique et sulfurique sous l'effet des cycles de gel/dégel :

La figure IV.52 regroupe le spectre atomique et l'image MEB de la composition BHP70FS attaqué par un mélange des deux acides acétique et sulfurique sous l'effet des cycles de gel/dégel. L'image MEB montre l'apparition d'un champ significatif de microfissures au sein de la pâte, au niveau des granulats calcaires et à l'interface entre la pâte et les granulats siliceux. Les longueurs des microfissures est de l'ordre de quelques micromètres, qui se propages dans toutes les directions. L'analyse EDS montre que l'échantillon contient des pics de Ca, O, Si, Al et C qui sont les éléments fondamentaux dans la composition des produits d'hydratation. Par ailleurs, il est observé qu'il n'y a pas de soufre S dans l'analyse par EDS. L'image par MEB plus de grossissement X6500 présentée dans la figure IV.52 montre une cristallisation de gel au sein de l'échantillon avec très faible quantité comparativement à l'échantillon testée sous l'effet d'une température de 20C°. En outre, nous remarquons que la texture des hydrates est différente comparativement aux autres protocoles, on observe comme des fractures importantes ou une cristallisation non régulière des hydrates, ceci peut être expliqué par l'effet de gel/ dégel qui bris les hydrates. L'analyse par DRX figure IV.53 détecte la formation de l'étringite, de la Thaumasite et du gypse par cristallisation dans l'échantillon de béton broyé.



CHAPITRE IV : DURABILITE AUX ACIDES



Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
C K	0.03	0.06	58.08	0.21	0.8859	0.0287	1.0000
O K	54.95	72.81	10.30	593.37	0.8967	0.0385	1.0000
Mg K	1.25	1.09	9.19	60.79	0.9131	0.1698	1.0077
Al K	1.22	0.96	8.22	89.09	0.9167	0.2680	1.0130
Si K	12.98	9.79	6.95	1316.99	0.9201	0.3809	1.0111
K K	0.35	0.19	4.34	41.73	0.9348	0.7607	1.1004
Ca K	27.62	14.61	2.67	2843.37	0.9374	0.8135	1.0125
Fe K	0.86	0.32	2.51	60.85	0.9515	0.8934	1.0530
Mo L	0.75	0.16	6.12	38.46	0.9272	0.5052	1.0123

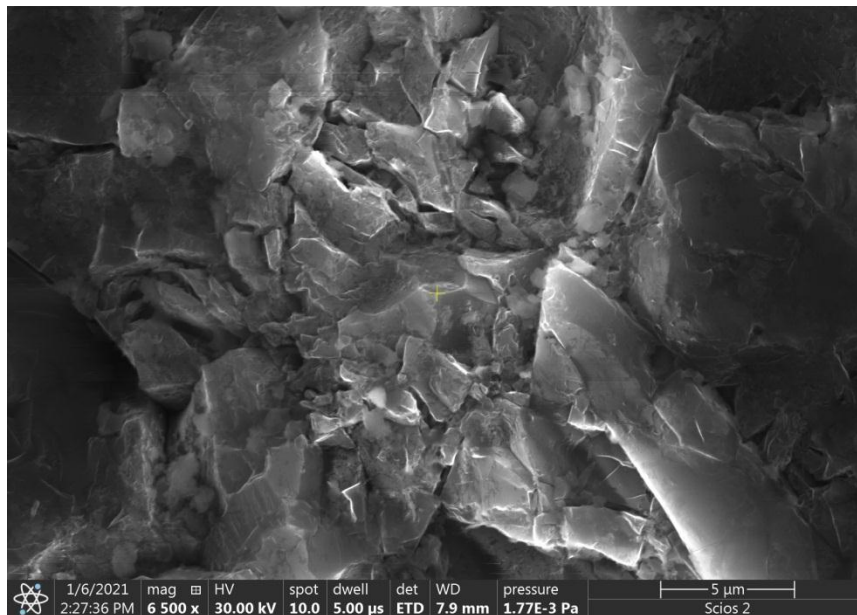


Figure IV.52: Observation au **MEB** accompagné par des analyses par **EDS** pour l'échantillon **BHP 70FS** après 4 mois d'immersion en solution de composée d'un mélange de 5 % d'acide acétique et de 5 % d'acide sulfurique, soumise aux cycles de gel et de dégel.

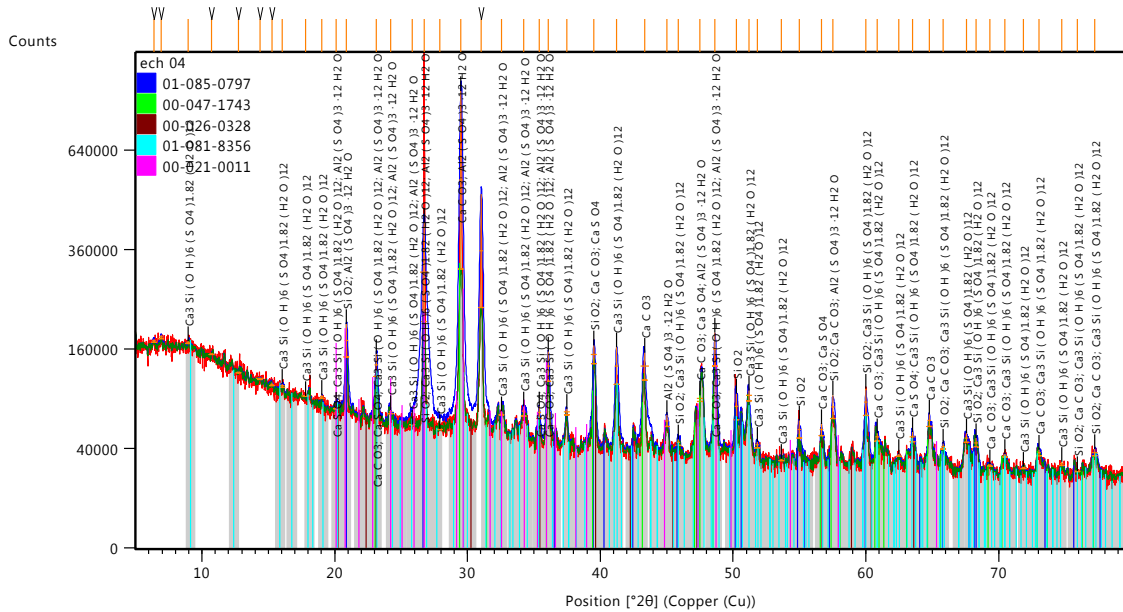
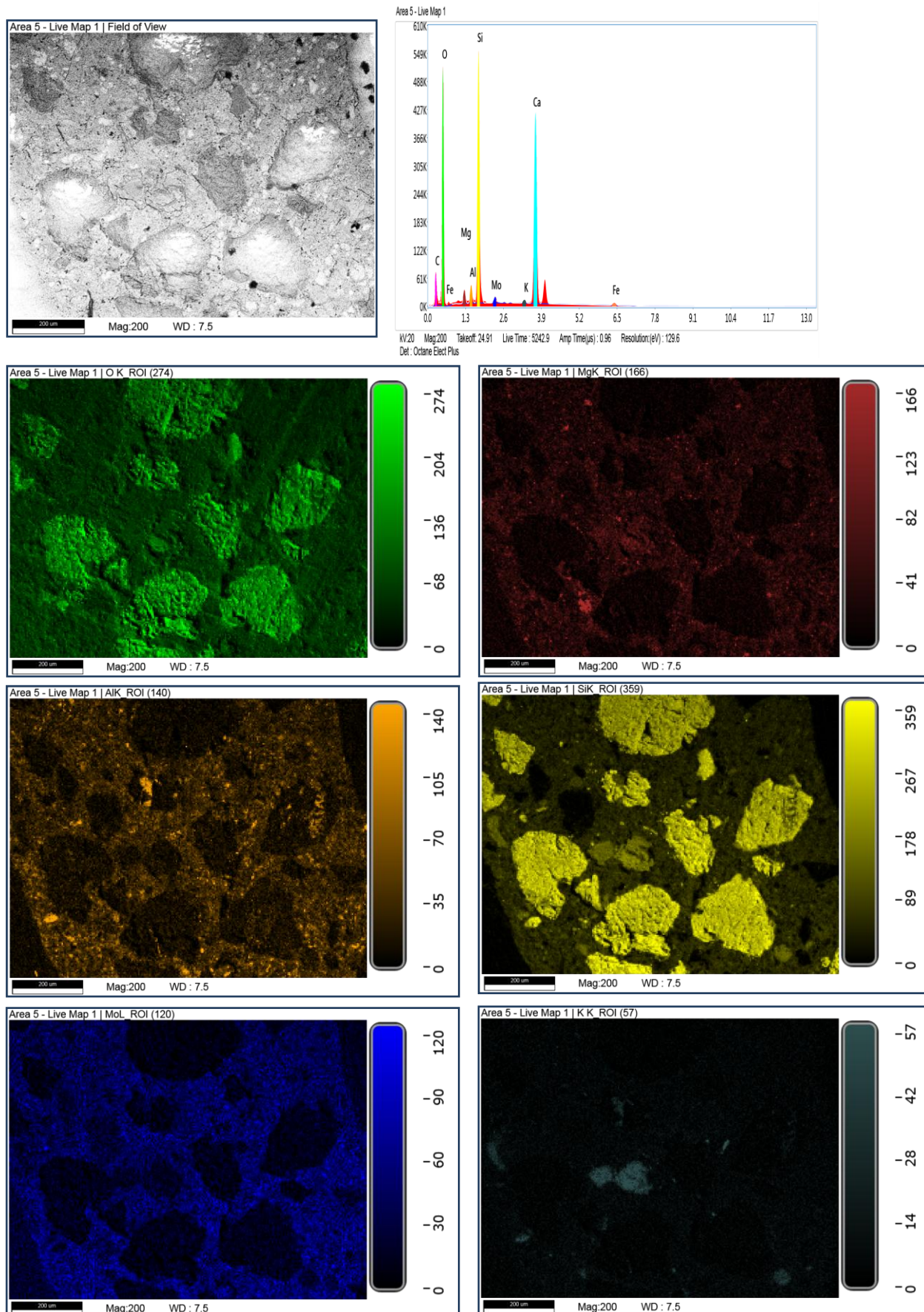


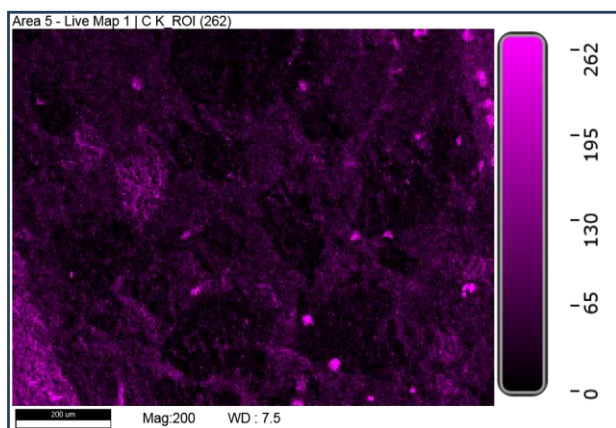
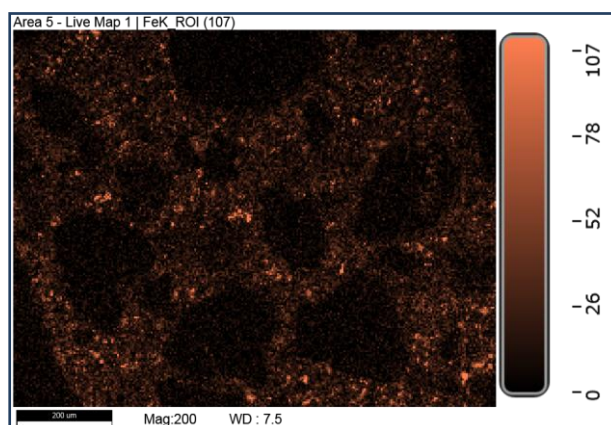
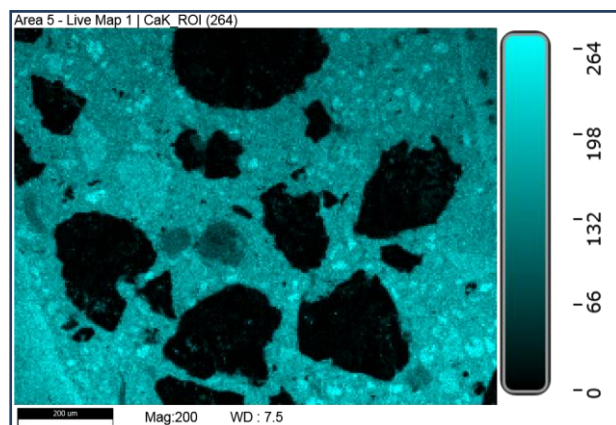
Figure IV.53: Analyse par **DRX** sur l'échantillon **BHP70FS** après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide acétique et 5% de l'acide sulfurique sous l'effet des cycles de gel/dégel.

IV.2.6.4 Analyse par MEB/EDS et DRX après l'attaque du béton par un mélange de l'acide acétique et sulfurique sous l'effet d'une température élevée de 50C° :

La figure IV.54 illustre le spectre atomique et la cartographie de l'image de **BHP70FS** attaqué par un mélange des deux acides acétique et sulfurique sous l'effet d'une température élevée de 50C°. La représentation **MEB** démontre la formation de pores et de microfissures au niveau de la pâte, des granulats calcaires, et à l'interface entre la pâte et les granulats siliceux. Les longueurs des microfissures observées sont de quelques micromètres que se propages dans toutes les directions. L'analyse **EDS** montre que l'échantillon contient des pics de **Ca**, **O**, **Si**, **Al** et **C** qui sont les éléments majeurs interviennent dans la composition des produits d'hydratation et de l'acétate de calcium. En outre, on constate l'absence de soufre **S** a été remarque dans l'analyse par **EDS**. L'image par **MEB** plus de grossissement **X6500** présentée dans la figure IV.54 montre une cristallisation de gel au sein de l'échantillon à proportion importante comparativement aux attaques par acides, à une température de 20°C et sous l'influence des cycles de gel et de dégel, on observe l'apparition de microfissures significatives au niveau des hydrates et le gel formé, ceci peut être expliqué par l'effet de haute température qui accélère les réactions chimiques est par conséquent augmente les proportions des sels résultent. Contrairement, L'analyse par **DRX** figure IV.55 détecte la cristallisation de l'Ettringite et gypse au sein de l'échantillon béton broyé.



CHAPITRE IV : DURABILITE AUX ACIDES



Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
C K	0.02	0.04	99.99	0.12	0.8920	0.0597	1.0000
O K	56.87	73.87	9.99	668.53	0.9036	0.0980	1.0000
Mg K	1.42	1.21	7.69	57.66	0.9209	0.3509	1.0076
Al K	1.36	1.05	6.42	70.62	0.9247	0.4808	1.0129
Si K	14.78	10.93	5.10	914.01	0.9284	0.5979	1.0093
K K	0.34	0.18	4.21	16.04	0.9442	0.8703	1.0849
Ca K	23.63	12.25	2.21	916.54	0.9470	0.9017	1.0129
Fe K	0.79	0.29	3.15	16.60	0.9629	0.9539	1.0552
Mo L	0.79	0.17	5.34	20.72	0.9360	0.6930	1.0100

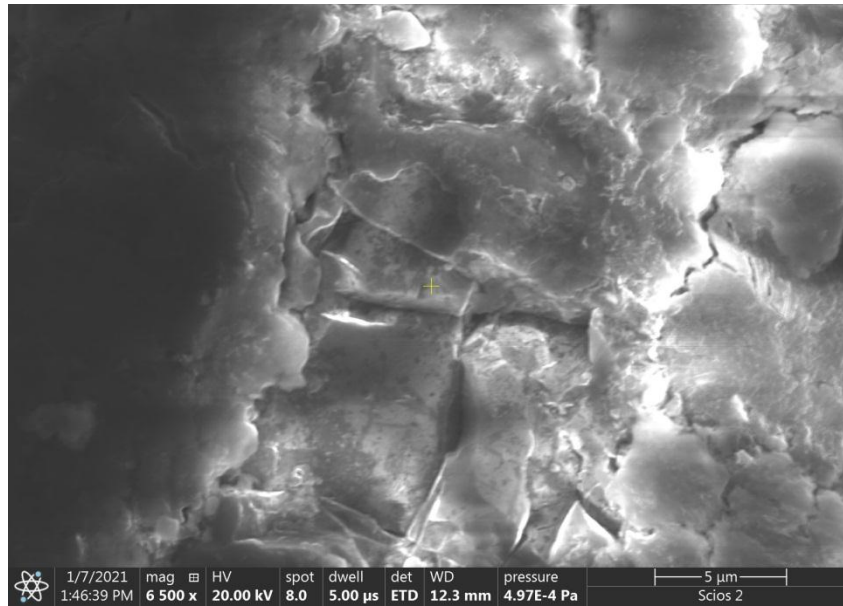


Figure IV.54: Observation au **MEB** accompagné par des analyses par **EDS** pour l'échantillon **BHP70FS** après 4 mois d'immersion en solution à base de mélange de 5% d'acide acétique et 5% d'acide sulfurique sous l'effet d'une température élevée de 50C°.

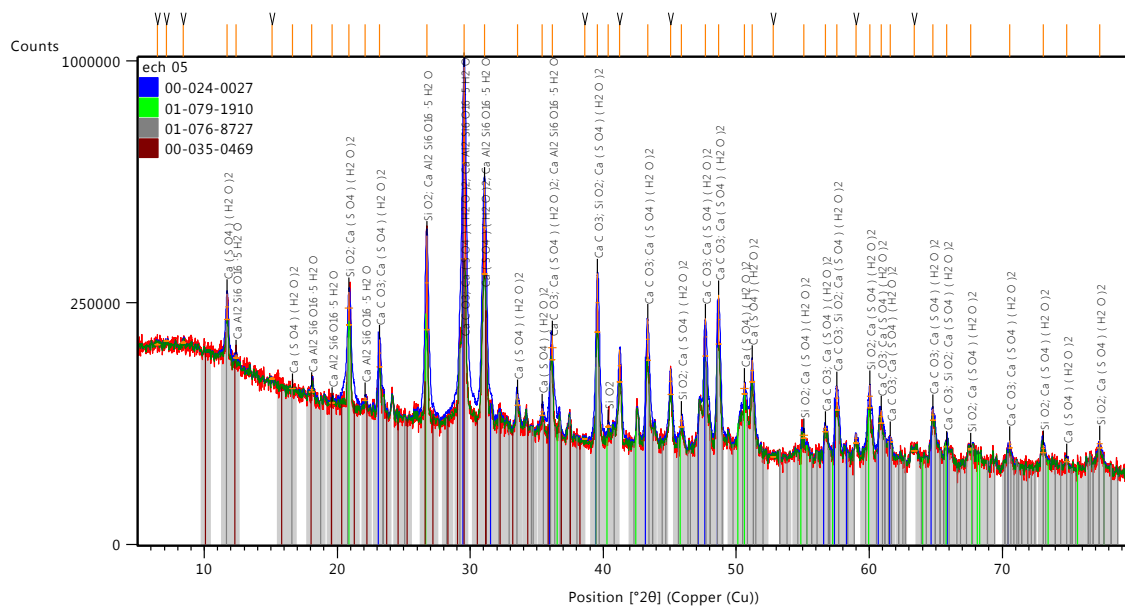


Figure IV.55: Analyse par **DRX** sur l'échantillon **BHP70FS** après 4 mois d'immersion en solution à base de 5% d'acide acétique et 5% de l'acide sulfurique sous l'effet d'une température élevée de 50C°.

IV.3 Synthèse du chapitre:

L'examen de la durabilité des diverses compositions des **BHP** soumises à des attaques acides uniques acétique et sulfurique nous a montré que la résistance chimique et mécanique des **BHP** a été légèrement affectée par l'attaque d'acide acétique, tandis, une baisse notable des caractéristiques physico-mécaniques a été observée suite à l'attaque de l'acide sulfurique. La diminution de la résistance mécanique à la compression atteint 46 %, et les pertes de masse relatives s'élèvent à 5 %.

Attaque des mélanges d'acides combinés à une température de 20°C:

L'évaluation de la durabilité des **BHP** face à un mélange d'acides (acétique et sulfurique) à une température ambiante de 20°C a démontré une augmentation des vitesses d'altération et des taux de variation de masse à la fin de l'expérience, dont ces taux étant presque le double comparativement aux attaques par l'acide sulfurique et six fois supérieur comparativement aux attaques par l'acide acétique. Une chute considérable de la résistance mécanique a été observée dans tous les échantillons testés.

L'application de conditions climatiques combinées aux essais accélérées des attaques par le mélanges d'acides nous a permet de tirer les principales conclusions suivantes :

Attaque des mélanges d'acides combinés à l'effet de gel/dégel :

La résistance aux altérations extérieurs et mécanique des **BHP** testés a été remarqué supérieur à celles testées à une température de 20°C. En outre, les caractéristiques physiques porosités accessible à l'eau, vitesse du son des échantillons testées aux attaques par un mélange d'acides combinés à l'effet de gel/dégel ont été remarquées meilleurs à celles testées à température de 20°C.

Attaque des mélanges d'acides combinés à une température élevée de 50°C:

L'étude de la durabilité des **BHP** aux attaques par un mélange d'acides combinés à une température élevée de 50°C montre que l'acidité des solutions agressives reste inférieure à quatre 4 au cours des vingt 20 premiers jours d'immersion des échantillons dans la solution. On a constaté que les taux de variation des masses étaient plus faibles à celle obtenues par attaque d'acides à une température de 20°C ; cela peut s'expliquer par la solubilité ainsi qu'à la dégradation de la couche supérieure des échantillons. Il a été noté que la porosité accessible à l'eau est légèrement plus élevée, surtout pour les échantillons à base de fumée de silice.

Cette observation peut être attribuée à l'adhérence de la couche endommagée sur l'échantillon, ce qui conduit à une augmentation de la porosité et à une réduction de la vitesse du son. Les taux de diminution de la résistance à la compression ont atteint des niveaux maximaux lors de cette expérience, cela est attribué à l'accélération du processus de dégradation provoquée par l'augmentation de la température.

L'étude de la microstructure a démontré la cristallisation du sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, connu sous le nom de gypse dans les différents protocoles utilisés. Une cristallisation des hydrates différents a été observée dans l'échantillon testé après l'attaque par un mélange d'acides sous l'effet des cycles de gel/dégel, et ce, en comparaison avec les échantillons examinés à des températures de 20°C et 50°C. L'attaque par un mélange d'acides combinés aux cycles de gel/dégel montre la cristallisation de l'étringite, de la Thaumassite. Les proportions des gels cristallisés ont été remarqués très faibles comparativement aux autres protocoles, ceci justifie les meilleures caractéristiques physico-mécaniques des **BHP** obtenues à l'issue de l'essai d'attaque réalisé avec le mélange d'acides combiné aux cycles de gel et de dégel.

sous l'effet d'une température de 50 °C, l'attaque du BHP 70FS par un mélange d'acides conduit à la formation de cristaux de sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gypse) qui a été détectés aussi à la suite de l'attaque de mélange des acides à une température de 20 °C, les proportions des sels nouvellement détectés à haute température ont été remarqués supérieurs à celles obtenues sous une température de 20°C°. Cette augmentation dans les proportions peut être expliqué, par l'accélération des réactions chimiques sous une température élevée, et qui provoqué un endommagement dans le **BHP** et par conséquent une diminution de ces caractéristiques mécaniques, qui ont été observées supérieur aux autres protocoles.

V.1. Introduction : la présente étude a été consacré à (I) L'analyse de la durabilité des bétons haute performance contenant ou non du fumé de silice face aux agressions extérieures du sulfate de magnésium MgSO_4 à une concentration de 5 % à une température ambiante de 20 °C. (II) Évaluation de la durabilité des BHP avec et sans fumé de silice sous l'influence du sulfate de magnésium MgSO_4 en tenant compte des effets conjugués des cycles de gel et de dégel et sous l'effet d'une température élevée de 50°C.

V.2. Résultats et interprétation :

V.2.1. Durabilité des BHP face aux agressions causées par le sulfate de magnésium MgSO_4 à une température ambiante de 20°C :

V.2.1.1. Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure V.01 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai.



Figure V.01 : Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes testées sous une température de 20C°.

Les éprouvettes maintenues dans une solution contenant des sulfates de Magnésium MgSO_4 sous une température ambiante 20°C ont été caractérisées par une surface lisse sans fissures avec un aspect blanchâtre dans quelques zones de la surface externe. Après le découpage des éprouvettes aucune modification n'a été observée à l'intérieur des éprouvettes en BHP. Le changement de couleur apparait uniquement à la surface voir figure V.01.

V.2.1.2 Interprétation des résultats en relation avec les paramètres de formulation :

V.2.1.2.1 Taux de variation des masses

Les figures V.02 à V.09 illustrent l'évolution des taux de variation des masses en fonction du temps, ainsi que des rapports E/C et de la substitution de la fumée de silice. Elles présentent également la résistance mécanique à la compression et à la flexion, la porosité accessible à l'eau et la vitesse du son, pour les divers BHP examinés dans une solution agressive de sulfate de magnésium MgSO_4 à une température ambiante de 20°C .

Les courbes d'évolution des masses en fonction du temps pour les différents échantillons testés jusqu'à l'âge de six mois sont présentées dans les figures V.02, V.04 et V.06. Selon ces courbes on constate une légère augmentation des masses dans tous les échantillons en fonction du temps. Les taux d'augmentation des masses pour les échantillons sans fumée de silice ont été constatés supérieurs à ceux des échantillons avec fumée de silice, dont la valeur maximale ne dépasse pas 0,8 %. Les taux maximaux d'augmentation des masses sont très peu influencés par la variation d'E/C.

V.2.1.2.2 Evolution de la résistance mécanique à la compression :

Les graphiques présentés dans les figures V.03, V.05 et V.07 montrent l'évolution de la résistance mécanique à la compression, tant avant qu'après une période de six mois d'exposition au sulfate de magnésium MgSO_4 . Une diminution de cette résistance a été constatée dans tous les BHP. Le taux maximal de diminution a été observé dans les compositions sans fumé de silice sa valeur atteint 12.14% voir figure V.08. En résumé, l'intégration de la fumée de silice contribue de manière significative à améliorer la résistance mécanique sous l'effet d'attaque par le sulfate de Magnésium MgSO_4 . La fumé de silice réduit la concentration de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le béton. Cependant, la proportion de gel C-S-H dans le béton contenant de la fumée de silice augmente, ce qui conduit à une structure plus dense (voir les valeurs de la porosité accessible à l'eau) et améliore la résistance mécanique. Cette structure dense empêchera la pénétration des ions sulfates et, en conséquence, retardera les réactions d'attaque des sulfates et la formation de nouveaux sels de gypse et d'Ettringite, qui ont un impact négatif sur les propriétés initiales des BHP.

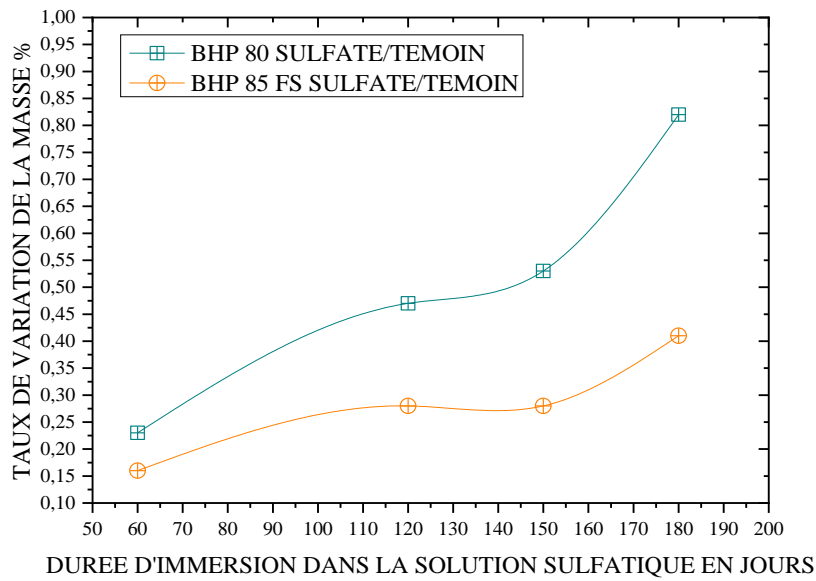


Figure V.02: Taux de variation de la masse des échantillons soumis à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,25.

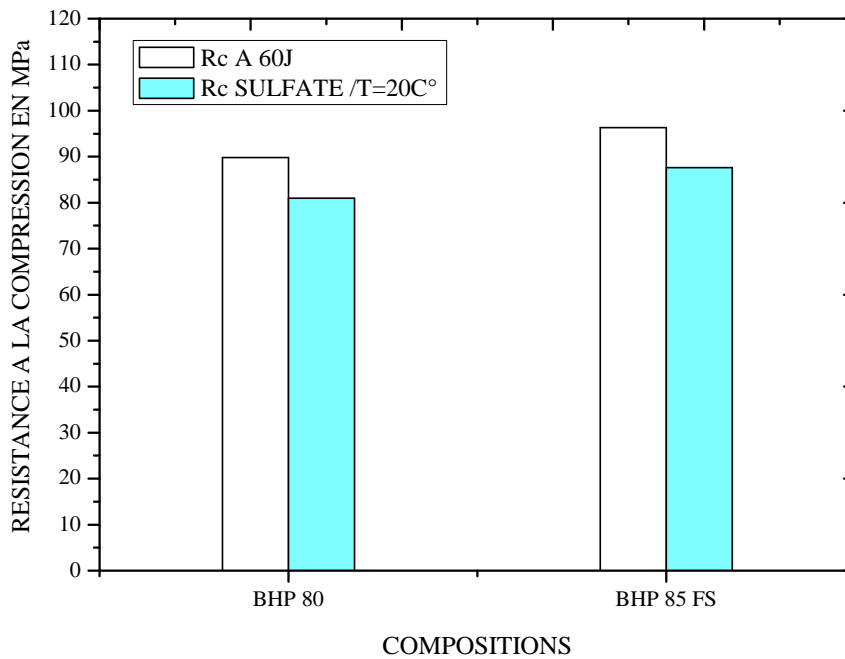


Figure V.03: Variation de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,25.

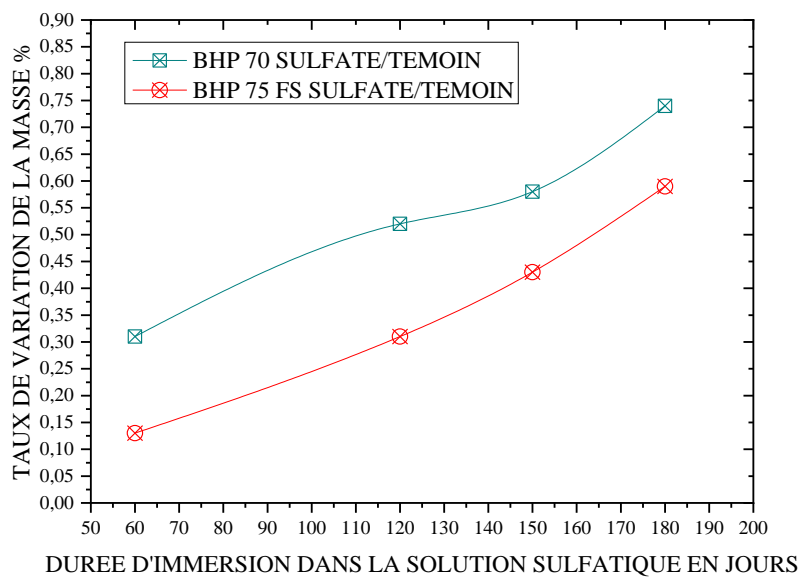


Figure V.04 : Taux de variation de la masse des échantillons soumis à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,3.

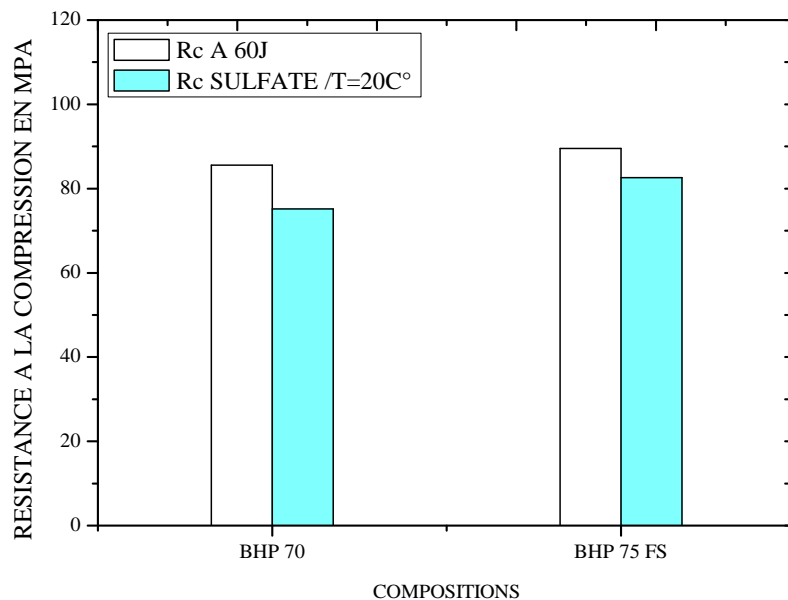


Figure V.05 : Variation de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes examinées à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,3.

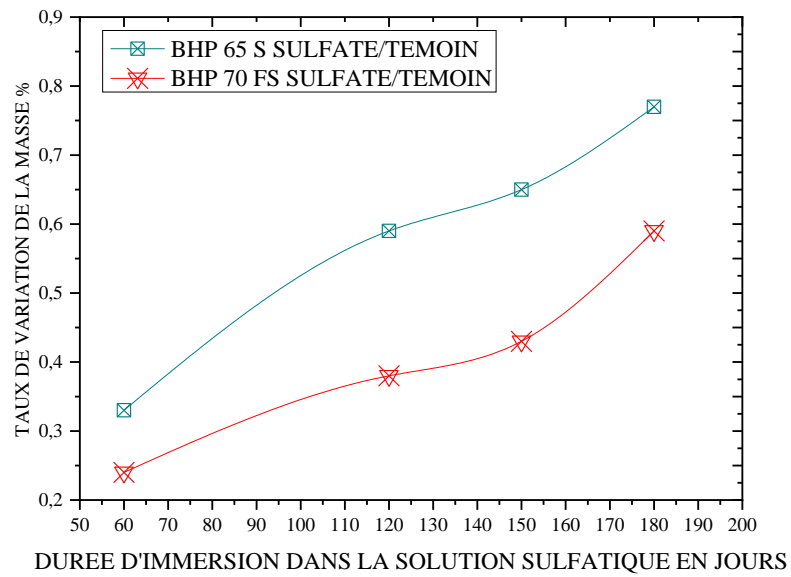


Figure V.06 : Taux de variation de la masse des échantillons soumis à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,35

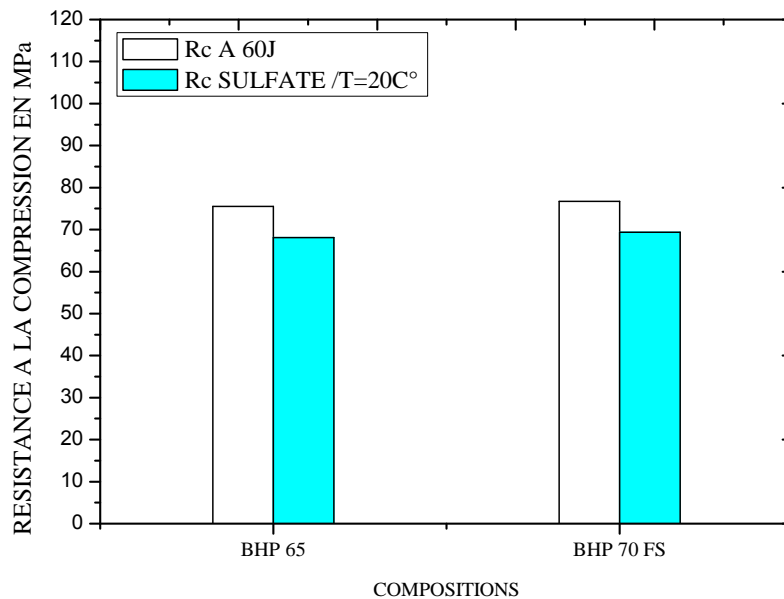


Figure V.07 : Variation de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes examinées à une température de 20°C avec un rapport E/C de 0,35.

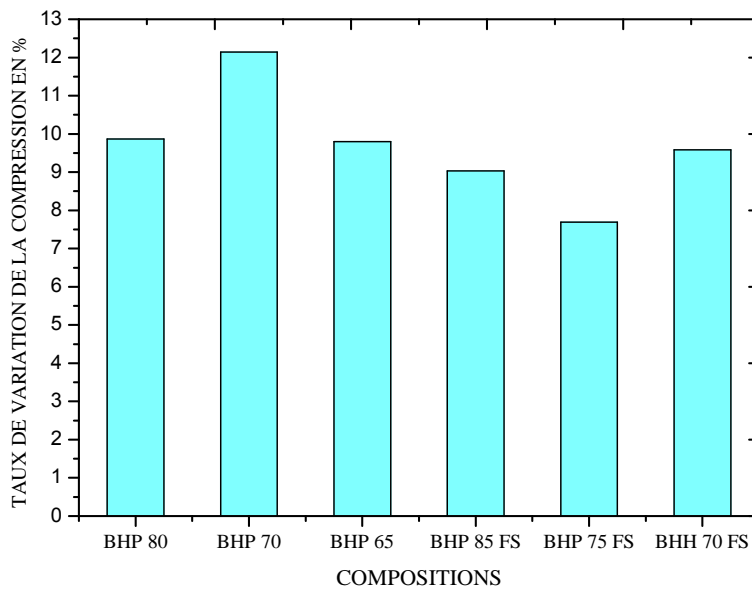


Figure V.08 : Taux de variation de la résistance à la compression des échantillons soumis à une température de 20 °C.

V.2.1.2.3 Porosité accessible à l'eau :

Les courbes d'évolution de la porosité accessible à l'eau sont illustrées dans les figures V.09, V.11 et V.13 montrent une diminution de la porosité accessible à l'eau dans toutes les compositions des BHP après l'attaque par le sulfate de Magnésium $MgSO_4$.

V.2.1.2.4 Vitesse du son :

Les histogrammes des figures V.10, V.12 et V.14 regroupent les valeurs de la vitesse du son des différentes compositions avant et après l'attaque par le sulfate de Magnésium $MgSO_4$, selon les résultats on constate une légère augmentation de la vitesse du son dans la majorité des compositions testées. Ceci peut être traduit par une modification de microstructure des BHP l'attaque (présence d'un nouveau matériau à des caractéristiques différentes).

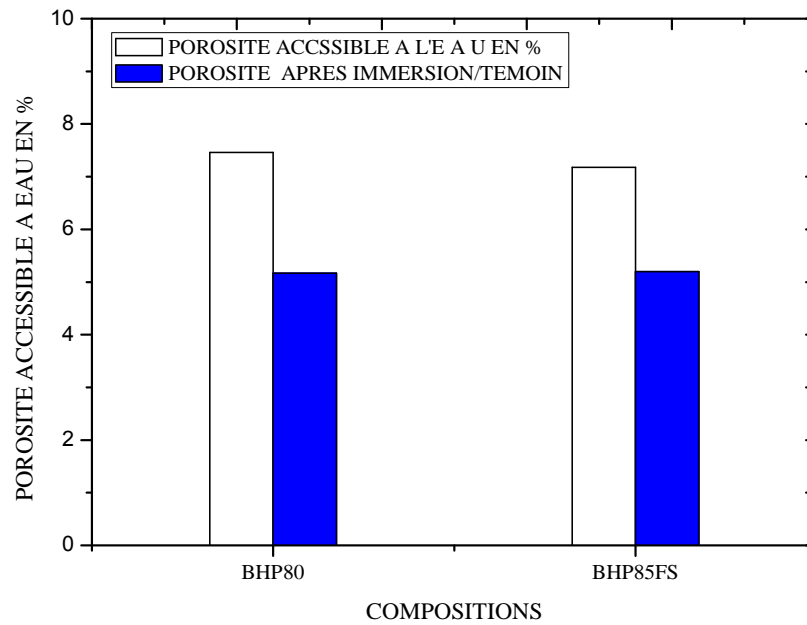


Figure V.09: Variation de la porosité des échantillons soumis à une température de 20 °C avec un rapport E/C de 0,25.

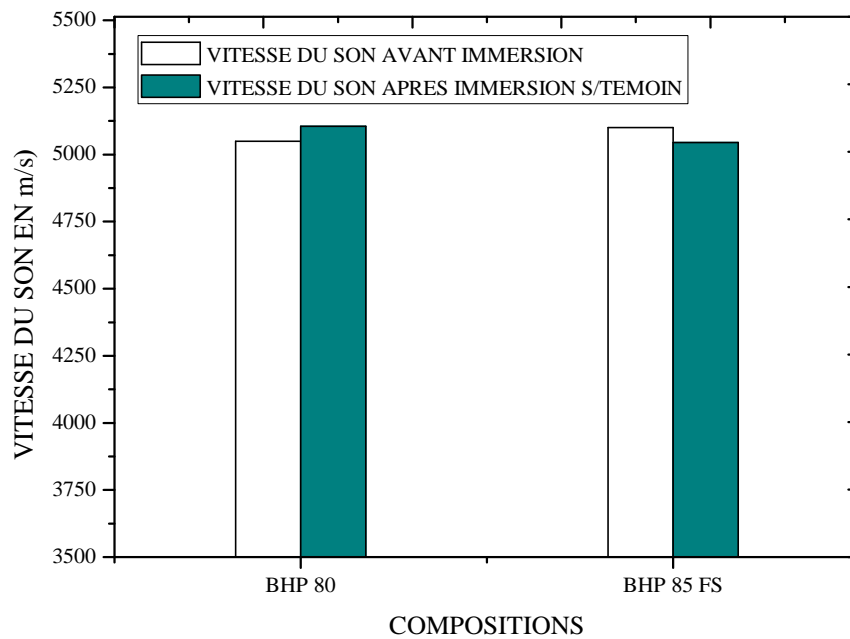


Figure V.10: Variation de la vitesse du son des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec un coefficient E/C de 0,25.

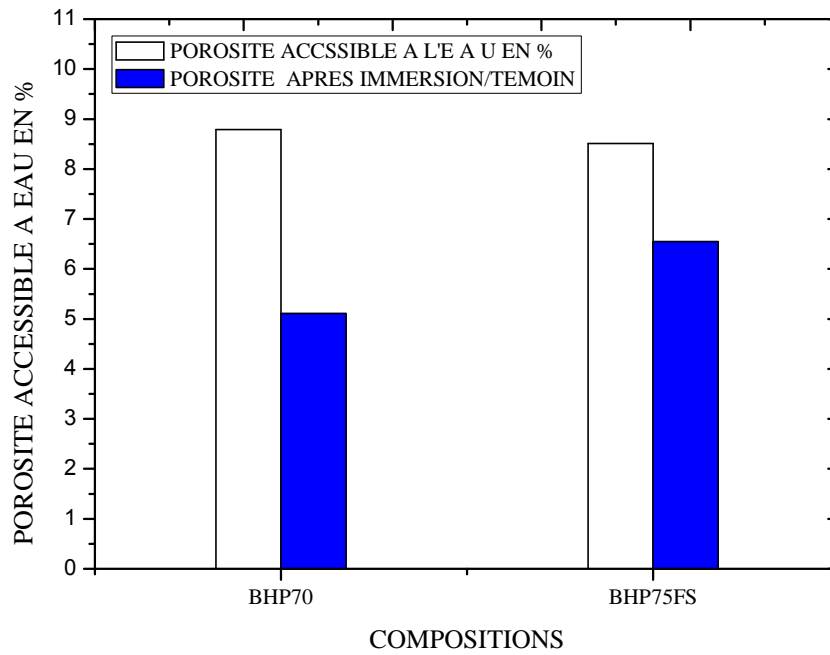


Figure V.11: Variation de la porosité des échantillons soumis à une température de 20 °C avec E/C=0.3.

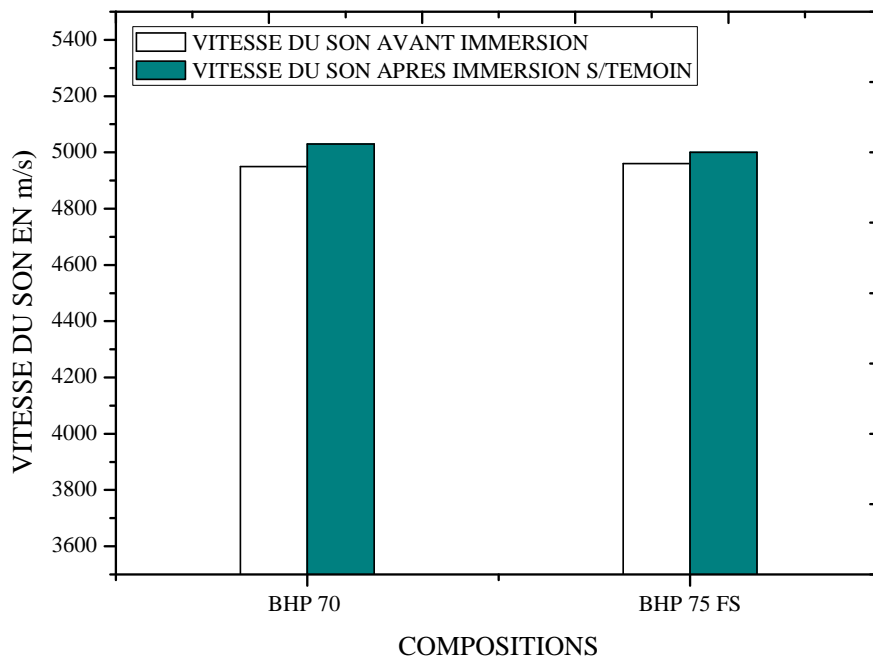


Figure V.12: Variation de la vitesse du son des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec E/C=0.3

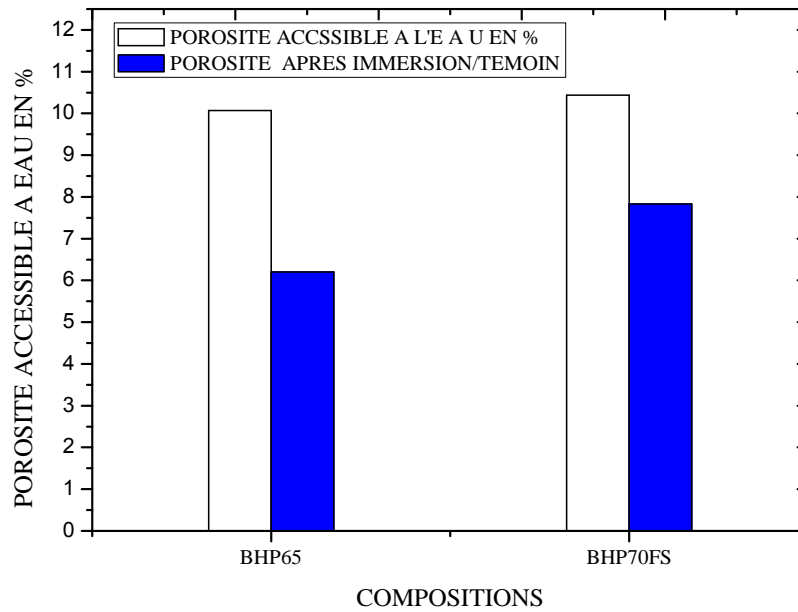


Figure V.13: Variation de la porosité des échantillons soumis à une température de 20 °C avec E/C=0.35

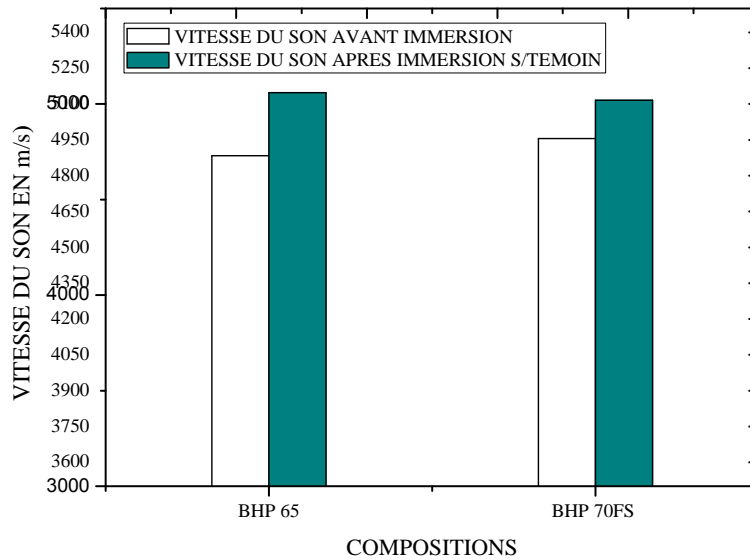


Figure V.14: Variation de la vitesse du son des éprouvettes examinées à une température de 20 °C avec E/C=0.35.

La réduction de la porosité accessible à l'eau et l'augmentation de la vitesse du son peuvent être attribuée à la cristallisation de nouveaux composés dans les pores, résultant des réactions chimiques entre les sulfates de magnésium (MgSO_4) et les produits de l'hydratation.

V.2.2. La durabilité des BHP face aux agressions du sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'influence des cycles de gel et de dégel :

V.2.2.1 Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure V.15 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai.



Figure V.15: Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes sous l'effet des cycles gel et de dégel.

Les éprouvettes, immergées dans une solution de MgSO_4 et exposées à des cycles gel/dégel ont été caractérisées par une surface lisse sans fissures avec un aspect blanchâtre dans quelques zones de la surface externe. Après le découpage des éprouvettes aucune modification n'a été observée à l'intérieur des éprouvettes en BHP. Le changement de couleur apparaît uniquement à la surface voir figure V.15.

V.2.2.2. Interprétation des résultats en tenant compte des paramètres de formulation:

V.2.2.2.1 Taux de variation des masses

Les graphiques V.16 à V.2 présentent l'évolution des taux de variation des masses, de la résistance à la compression, de la porosité accessible à l'eau et de la vitesse du son pour les

différentes compositions de BHP examinées dans une solution agressive de sulfate de magnésium $MgSO_4$, sous l'influence des cycles de gel et de dégel, en tenant compte des rapports E/C et de la substitution par de la fumée de silice.

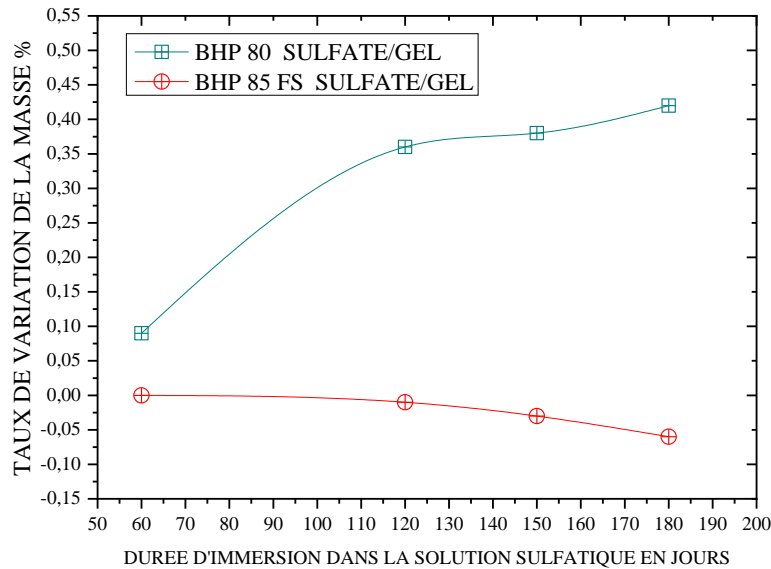


Figure V.16: Taux de variation de la masse sous l'influence des cycles de gel et de dégel avec $E/C=0.25$

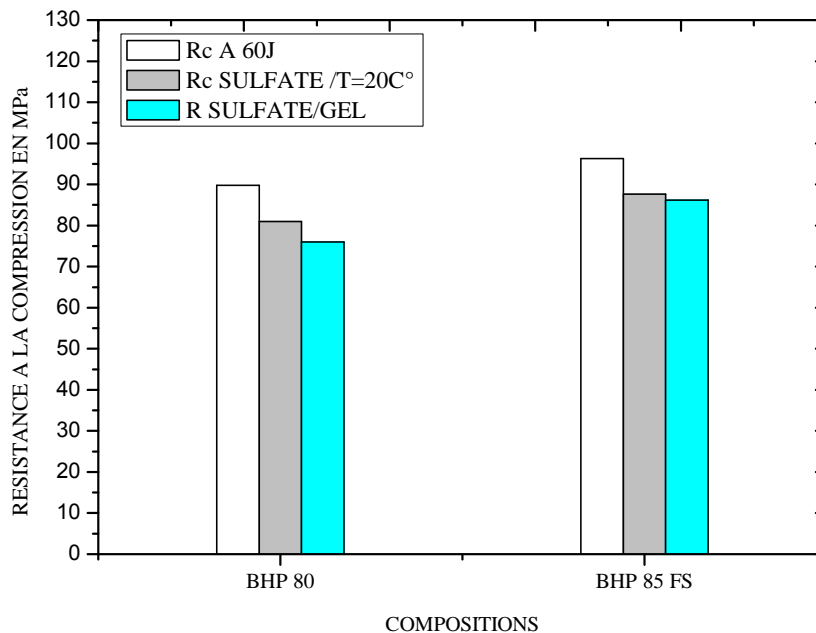


Figure V.17: Résistance mécanique à la compression sous l'effet des cycles gel/dégel avec $E/C=0.25$.

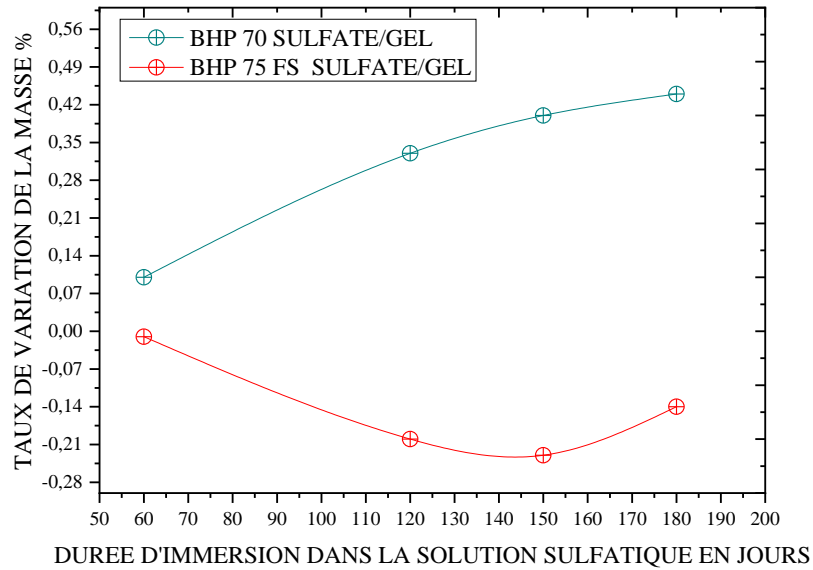


Figure V.18: Taux de variation de masse sous l'effet des cycles gel/dégel avec $E/C=0.3$

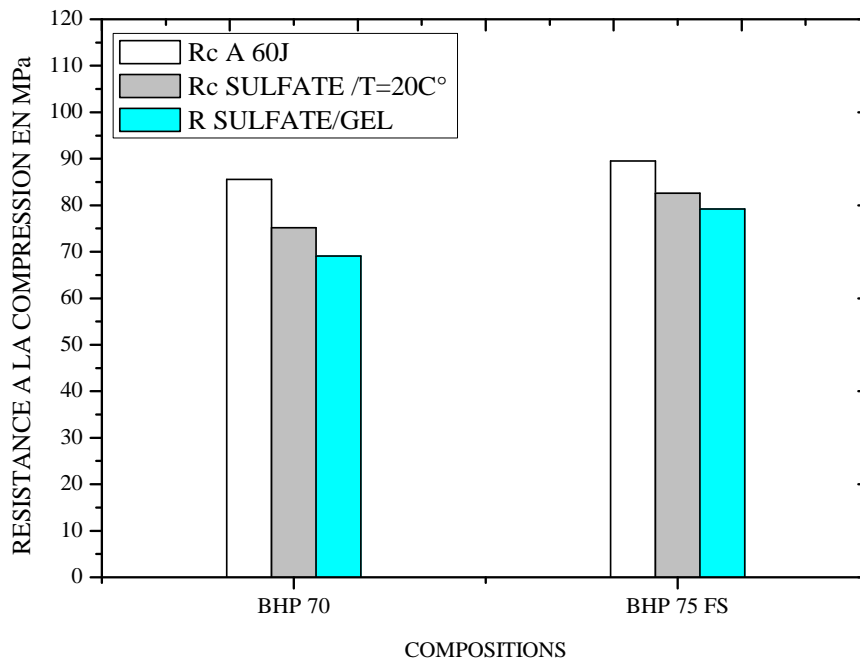


Figure V.19: Résistance mécanique à la compression sous l'effet cycles de gel et de dégel avec $E/C=0.3$.

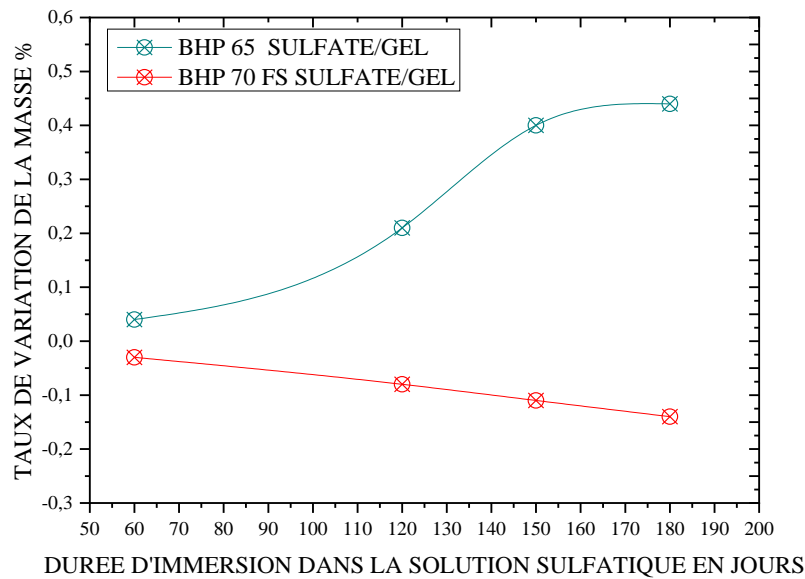


Figure V.20: Taux de variation de masse sous l'effet des cycles gel/dégel avec $E/C=0.35$

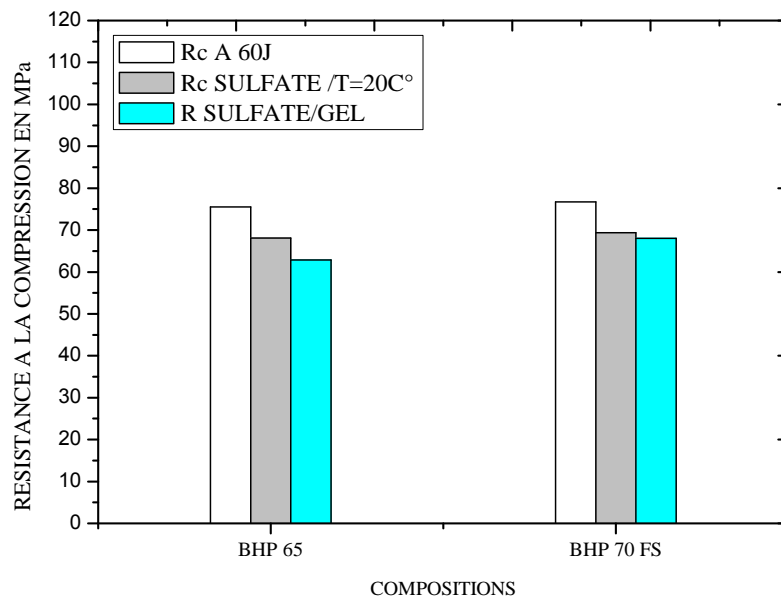


Figure V.21: Résistance mécanique à la compression sous l'effet des cycles gel/dégel avec $E/C=0.35$.

Les figures V.16, 18 et 20 montrent les courbes de la variation des masses en fonction du temps des différents échantillons examinés jusqu'à l'âge de six mois. Selon ces courbes on constate une légère augmentation des masses dans tous les échantillons au cours du temps, avec des taux d'augmentation des masses atteignant des niveaux maximaux, ont été observés

dans les échantillons sans fumé de silice sa valeur maximale n'excède pas le 0.45%, il s'agit donc de la moitié des taux constatés dans le cadre des évaluations de durabilité des BHP en présence de sulfates à une température de 20 °C. En outre, une légère diminution des masses a été notée dans les formulations des BHP contenant de la fumée de silice, avec une valeur maximale de 0.20%, ceci est expliqué par un léger écaillage des échantillons, qui est le résultat des cycles de gel et de dégel. Les variations de masse sont très peu affectées par les modifications du rapport E/C.

V.2.2.2.2 Evolution de la résistance mécanique à la compression : Les figures V.17, 19 et 21 illustrent les courbes représentant l'évolution de la résistance mécanique à la compression avant et après une exposition de six mois au sulfate de magnésium MgSO_4 . L'effet combiné des attaques par le sulfate de magnésium MgSO_4 et des cycles de gel/dégel a montré un impact défavorable sur la durabilité des BHP, entraînant une baisse de la résistance mécanique à la compression, surtout dans les formulations de BHP sans fumée de silice. La diminution maximale de la résistance mécanique à la compression a été observée dans les compositions sans fumée de silice, atteignant 23,89 %, comme le montre la figure V.34.

V.2.2.2.2 Porosité accessible à l'eau : La figure V.22 illustre les courbes d'évolution de la porosité accessible à l'eau pour les diverses compositions, tant avant qu'après l'exposition au sulfate de magnésium MgSO_4 , en tenant compte des effets des cycles de gel et de dégel. Une diminution de la porosité accessible à l'eau dans toutes les compositions des BHP après l'attaque par le sulfate de Magnésium MgSO_4 . Cette diminution a été remarqué inférieure à celles obtenues sous une température de 20C° notamment les compositions sans fumé de silice.

V.2.2.2.3 Vitesse du son : Dans l'histogramme de la figure V.23, les valeurs de la vitesse du son des diverses compositions sont rassemblées, tant avant qu'après l'attaque par le sulfate de magnésium MgSO_4 , en prenant en compte les effets des cycles de gel/dégel, il ressort des résultats une légère augmentation de la vitesse du son dans la majorité des compositions testées comparativement aux valeurs mesurés avant immersion des éprouvettes dans la solution agressive. Ainsi, le taux d'augmentation des vitesses a été remarqué un peu faible pour les compositions sans fumé de silice comparativement aux vitesses mesurés après les essais de durabilité aux attaques par les sulfates sous l'influence d'une température de 20 °C.

La réduction de la porosité accessible à l'eau et l'augmentation de la vitesse du son peuvent être expliqué par la cristallisation dans les pores des nouveaux composés se forment à la suite

des réactions chimiques entre les sulfates de magnésium MgSO_4 et les produits de l'hydratation.

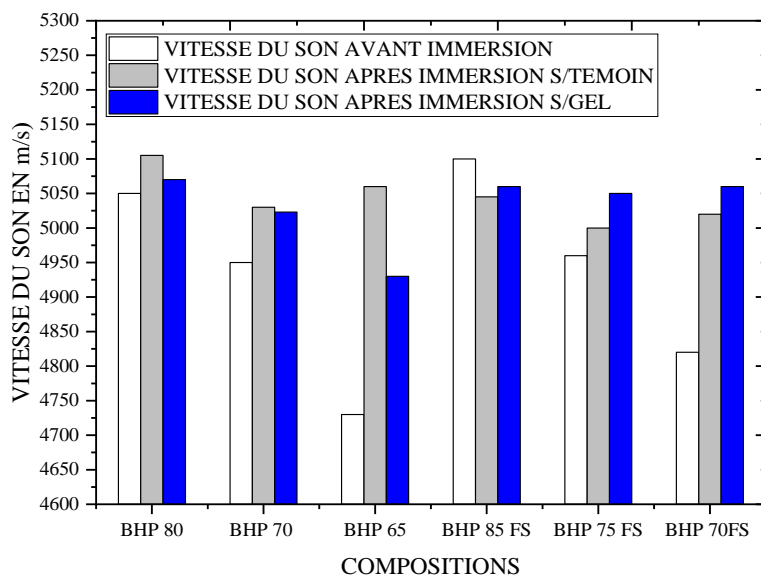


Figure V.22: vitesse du son sous l'effet des cycles gel/dégel

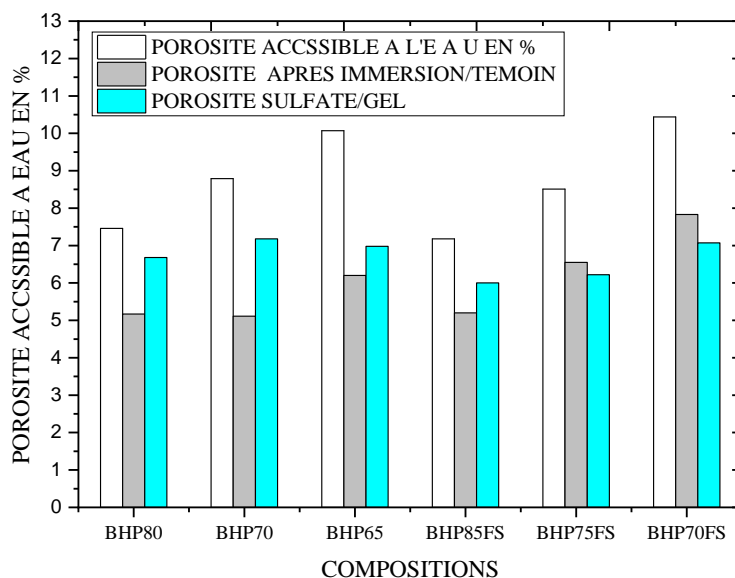


Figure V.23: Porosité accessible à l'eau sous l'effet des cycles gel/dégel

V.2.3. La durabilité des BHP soumis aux attaques du sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'effet d'une température élevée de 50°C :

V.2.3.1 Aspect extérieur et intérieur des éprouvettes après les essais : la figure V.24 montre l'aspect extérieur et intérieur des éprouvettes à la fin d'essai.



Figure V.24: Aspect extérieur et intérieur après nettoyage des éprouvettes sous l'effet d'une température élevée de 50°C.

Les éprouvettes maintenues dans une solution de sulfates de magnésium MgSO_4 , exposées à une température élevée de 50°C ont été caractérisées par une surface lisse sans fissures avec un aspect blanchâtre dans quelques zones de la surface externe. Après le découpage des éprouvettes aucune modification n'a été observée à l'intérieur des éprouvettes en BHP. Le changement de couleur apparait uniquement à la surface voir figure V.24.

V.2.3.2. Interprétation des résultats en relation avec les paramètres de formulation E/C et F.S:

Les figures V.26 et V.30 présentent l'évolution des taux de variation des masses, de la résistance mécanique à la compression et à la flexion, de la porosité accessible à l'eau, ainsi que de la vitesse du son des diverses compositions de BHP testées dans une solution agressive de sulfate de magnésium MgSO_4 , sous l'effet d'une température élevée de 50°C, en fonction des rapports E/C et de la substitution par de la fumée de silice.

V.2.3.2.1 Taux de variation des masses :

Une augmentation des masses au cours du temps pour chacune des compositions de BHP examinées. La composition BHP 70 sans de fumée de silice affiche un taux d'augmentation maximal atteignant 1,65 %, alors que le taux d'augmentation des masses des BHP à base de fumée de silice ne dépasse pas 1 %. Par ailleurs, ce taux d'augmentation des masses s'accroît avec l'élévation du rapport E/C.

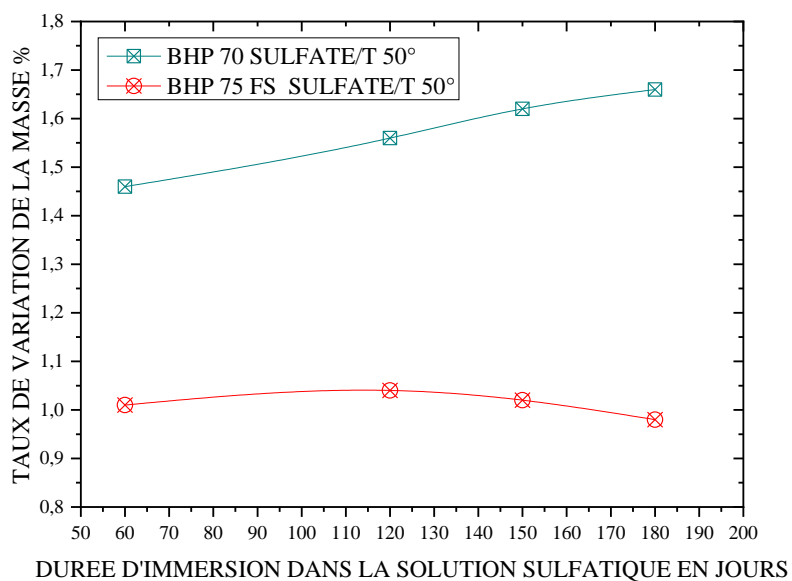


Figure V.25: Taux de variation de masse sous l'effet d'une température élevée de 50°C avec $E/C=0.3$

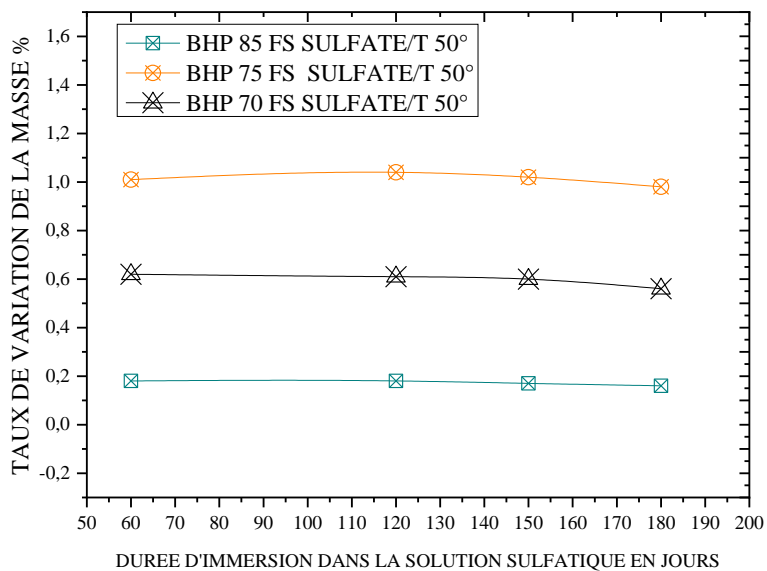


Figure V.26: Taux de variation de la masse en présence de fumée de silice sous l'influence d'une température élevée de 50 °C avec $E/C=0.25$, $E/C=0.3$ et $E/C=0.35$

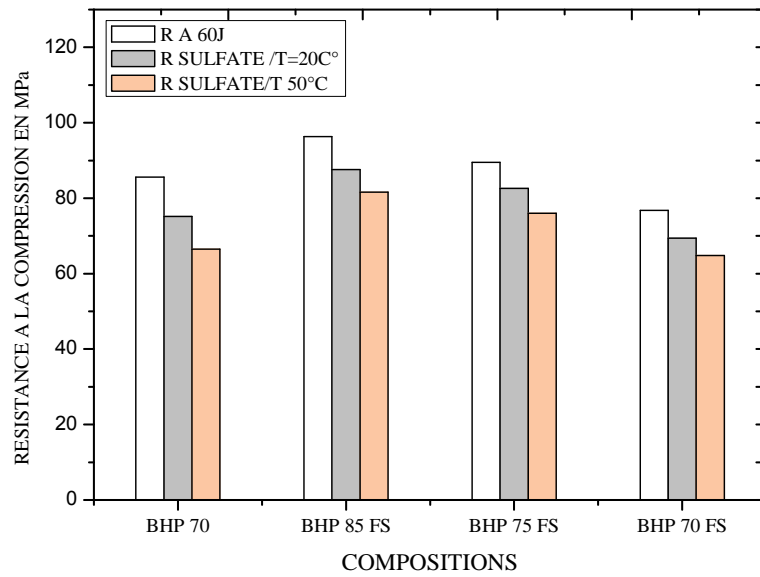


Figure V.27: Résistance mécanique à la compression sous l'effet d'une température élevée de 50C°.

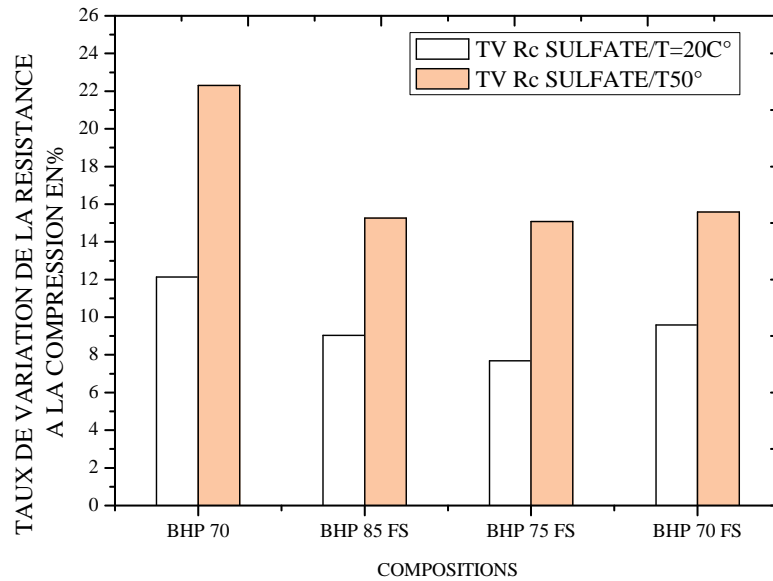


Figure V.28: Taux de variation de la résistance mécanique à la compression sous l'influence d'une température élevée de 50°C.

V.2.3.2.2 Evolution de la résistance mécanique à la compression :

Une diminution de la résistance à la compression a été observée à la fin de l'attaque. Selon la figure V.29, le taux de réduction atteint 22 % pour la composition BHP 70 (sans fumée de silice) et environ 15 % pour les autres compositions contenant de la fumée de silice. L'agression provoquée par le sulfate de magnésium, MgSO_4 , sous l'effet d'une haute température présente des effets plus dangereux comparativement aux attaques par sulfate sous une température de 20°C et sous l'effet combiné aux cycles de gel/dégel.

V.2.3.2.3 Vitesse du son :

La figure V.23 illustre un histogramme qui regroupe les valeurs de la vitesse du son des différentes compositions avant et après l'attaque par le sulfate de Magnésium MgSO_4 sous l'effet d'une haute température, selon les résultats on constate une légère augmentation de la vitesse du son dans la majorité des compositions testées comparativement aux valeurs mesurés avant immersion des éprouvettes dans la solution agressive.

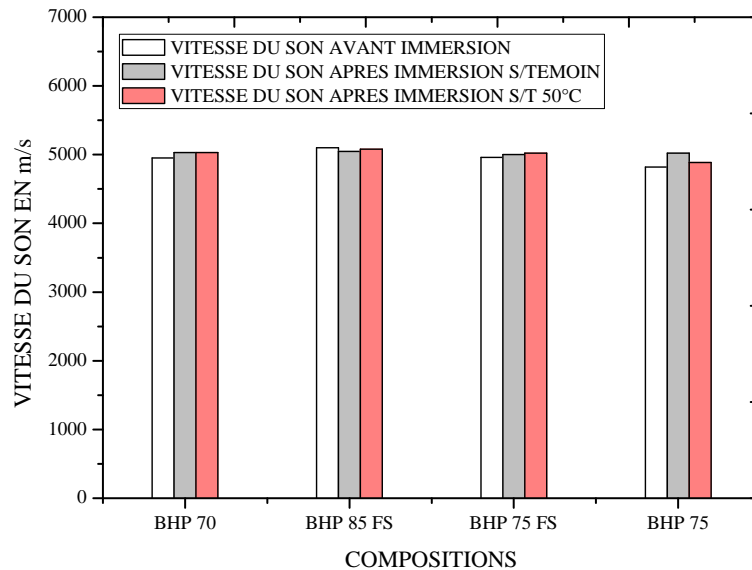


Figure V.29: Evolution de la vitesse du son sous l'effet d'une température élevée de 50°C .

V.2.3.2.4 Porosité accessible à l'eau : Une réduction de la porosité accessible à l'eau des échantillons a été constatée d'après les résultats obtenus après l'attaque du sulfate de

magnésium MgSO_4 sous l'effet d'une température de 50°C après 180 jours d'immersion des éprouvettes dans la solution agressive figure V.30 .

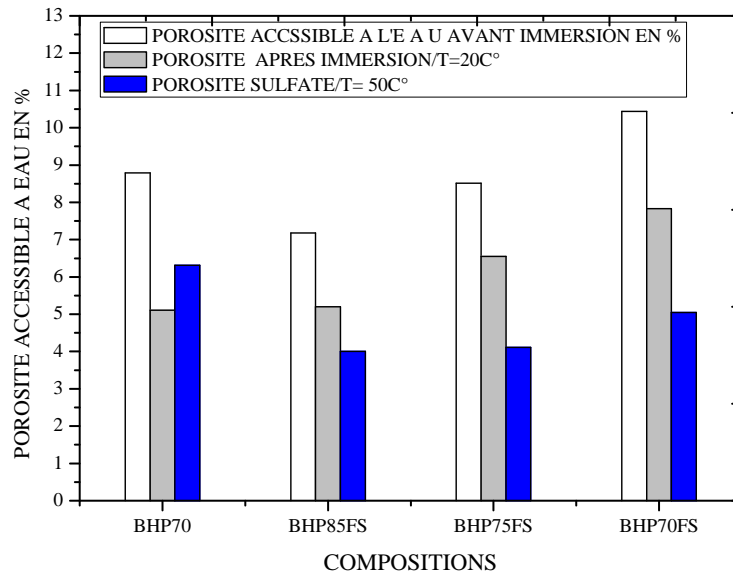


Figure V.30: Porosité accessible à l'eau sous l'effet d'une température élevée de 50°C .

V.3. ETUDE COMPARATIVE

V.3.1 Taux de variation de masses : En se référant à l'histogramme de la figure V.31, il est observé que les mesures des variations de masse sont réalisées lors de l'attaque du sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'effet d'une température de 20°C , sous l'influence d'une température de 20°C , ainsi que des cycles de gel et de dégel, et en raison d'une température élevée de 50°C après 180 jours d'immersion des éprouvettes dans la solution agressive. On constate que l'application combinée des conditions climatiques et de l'attaque du sulfate de magnésium MgSO_4 sur les BHP entraîne un effet significatif sur la variation relative des masses. En effet, le taux d'augmentation des masses des diverses compositions de BHP, exposées à une température élevée de 50°C , a été observé comme étant supérieur comparativement aux autres protocoles. Cela peut être interprété par l'accélération des réactions chimiques sous l'effet de températures élevées, entraînant une augmentation de la masse des sels résultants, ce qui accroît la masse des échantillons. Le classement des échantillons, tel qu'illustré dans le graphique de la figure V.31, se trouve dans les zones III et IV, où une augmentation maximale de la masse de 1,6 % a été observée dans les échantillons testés à une température de 50°C .

V.3.2 Porosité accessible à l'eau :

Les résultats indiquent qu'une diminution de la porosité accessible à l'eau des échantillons a été notée après l'attaque du sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'effet d'une température de 20°C , sous l'effet des cycles gel/dégel et sous l'effet de températures élevées atteignant 50°C après une immersion de 180 jours des éprouvettes dans la solution agressive, comme le montre la figure V.32; les valeurs minimales ont été observées dans les échantillons soumis à une température élevée de 50°C , où la majorité des échantillons a été classée dans la Zone I, avec des valeurs de porosité accessible à l'eau ne dépassant pas 5 %. Cela s'explique par l'accélération des réactions chimiques induites par la haute température, entraînant une augmentation de la masse des sels formés, qui occupe le volume des vides dans les échantillons et réduit ainsi leur porosité accessible à l'eau.

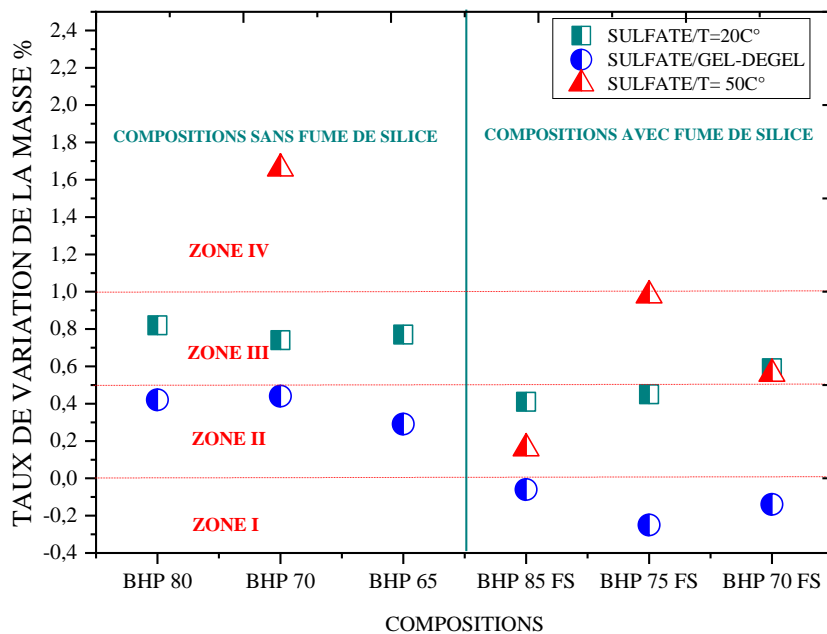


Figure V.31: Taux de variation de masse des protocoles utilisés.

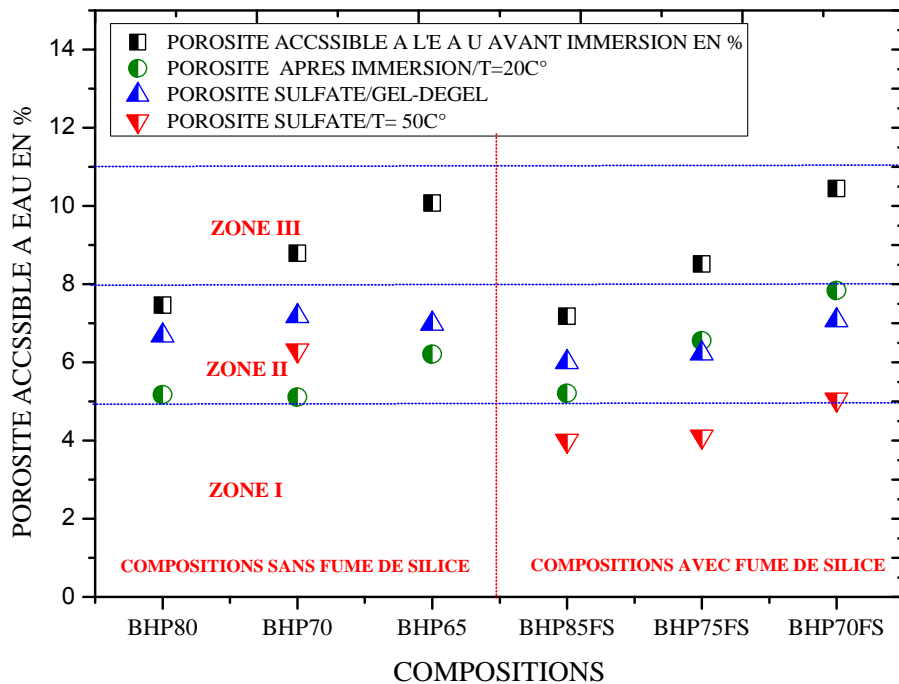


Figure V.32: Porosité accessible à l'eau des protocoles utilisés.

V.3.3 Résistance mécanique à la compression :

Les figures V.33 et 34 illustrent l'évolution de la résistance mécanique à la compression ainsi que les taux de variation successifs après 180 jours d'immersion des échantillons dans une solution agressive à base de sulfate de magnésium (MgSO_4), en tenant compte des effets de températures de 20 °C et 50 °C, ainsi que des cycles de gel et de dégel. De manière générale, une diminution de la résistance mécanique à la compression est observée dans toutes les combinaisons. Les taux de diminution les plus élevés ont été notés pour les échantillons exposés à une solution de sulfate de magnésium (MgSO_4) à une température élevée de 50 °C, où le taux de diminution variait entre 15,08 % et 22,3 % dans les zones II et III, comme le montre la figure V.34. L'attaque par le sulfate de magnésium (MgSO_4) associée aux cycles de gel et de dégel entraîne une réduction de la résistance mécanique à la compression qui dépasse celle observée avec l'attaque de MgSO_4 à 20 °C, avec des taux de diminution enregistrés à la fin de ce test variant de 10,49 % à 19,28 % dans les zones II et III. Les mesures de la résistance mécanique à la compression, après exposition au MgSO_4 à 20 °C, montrent que la diminution ne dépasse pas 12,14 %, avec des valeurs variant de 7,69 % à 12,14 % dans les zones I et II.

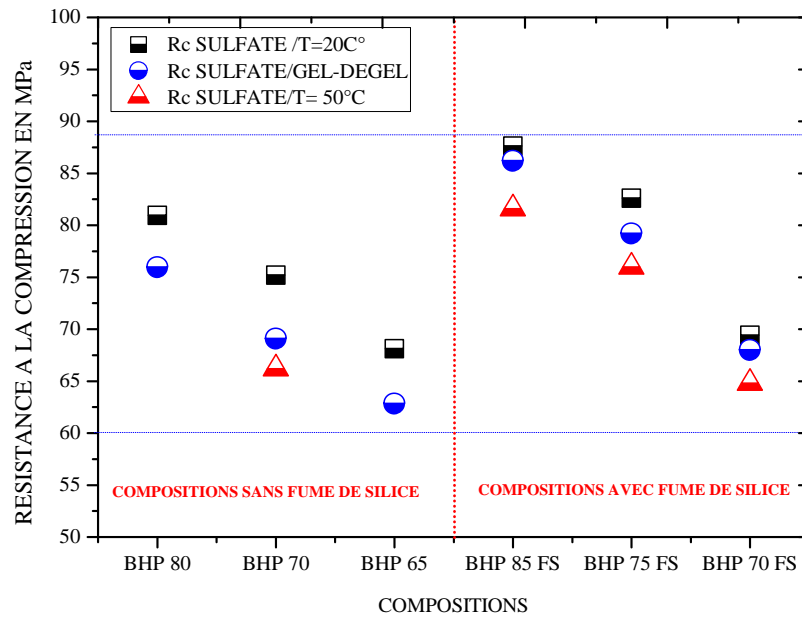


Figure V.33: Résistance mécanique à la compression des protocoles utilisés.

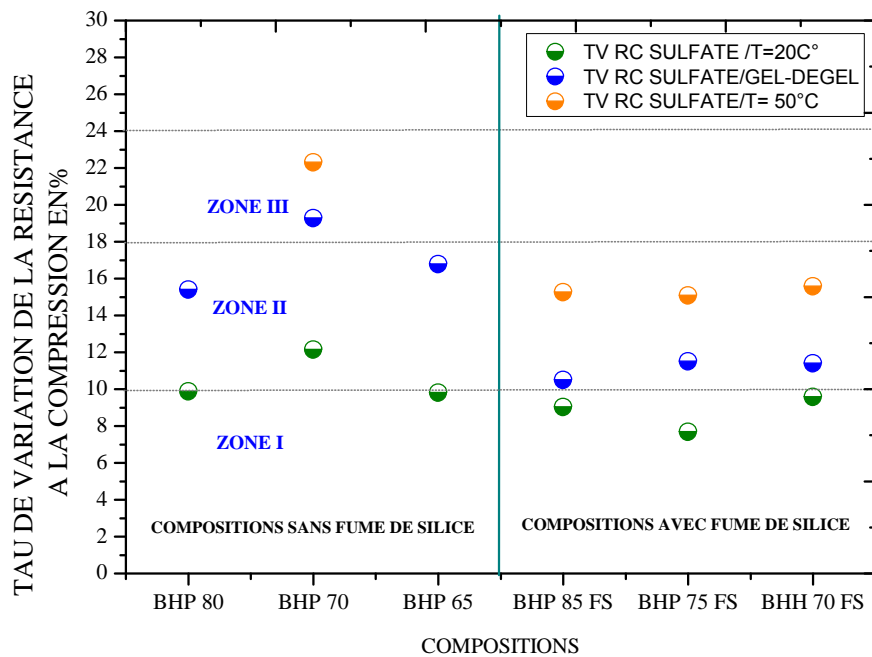


Figure V.34: Taux de variation R_c des protocoles utilisés.

V.4 Analyses microstructures :

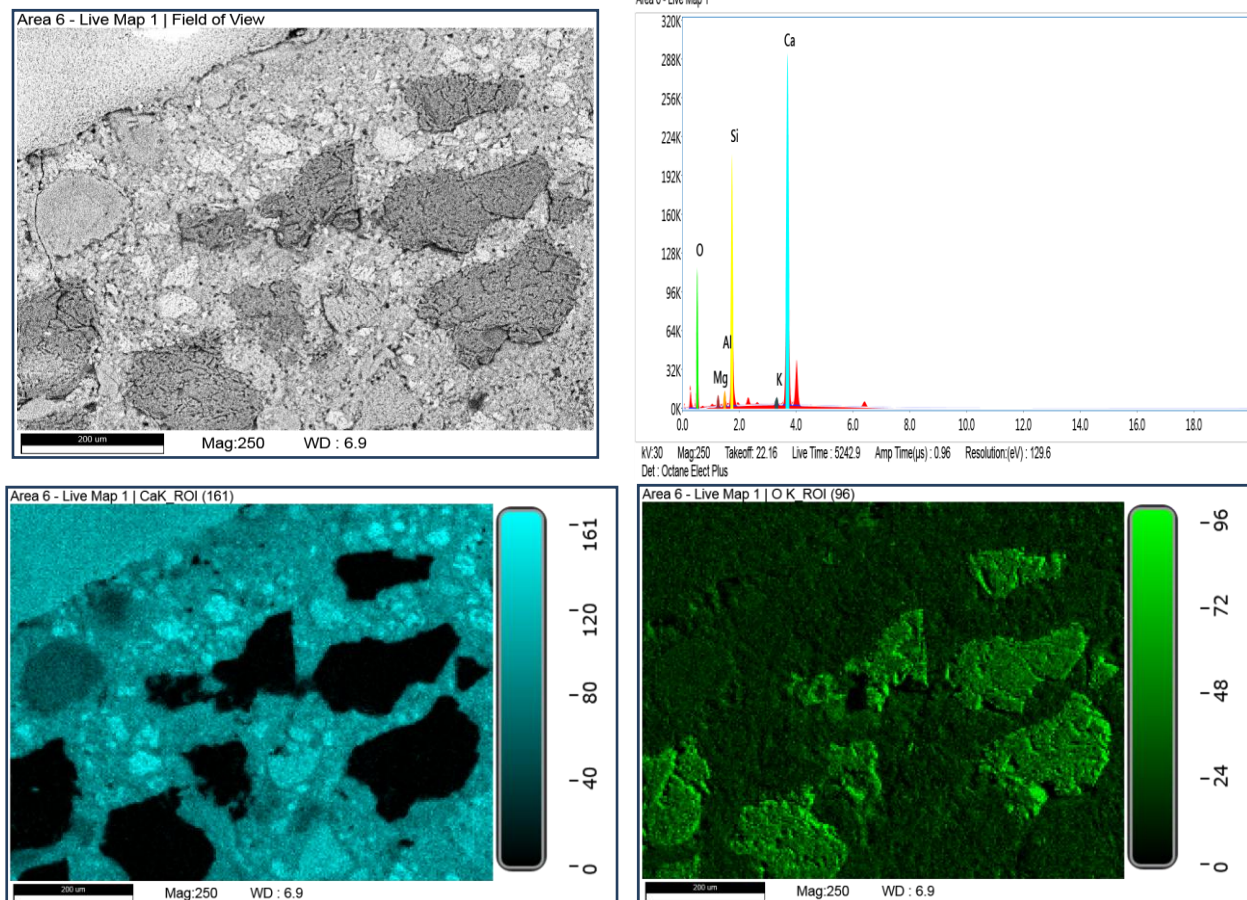
Des analyses microstructures par MEB/EDS et par DRX ont été effectués à la fin des essais d'attaques par les sulfates afin de vérifier tous types de modification au sein du

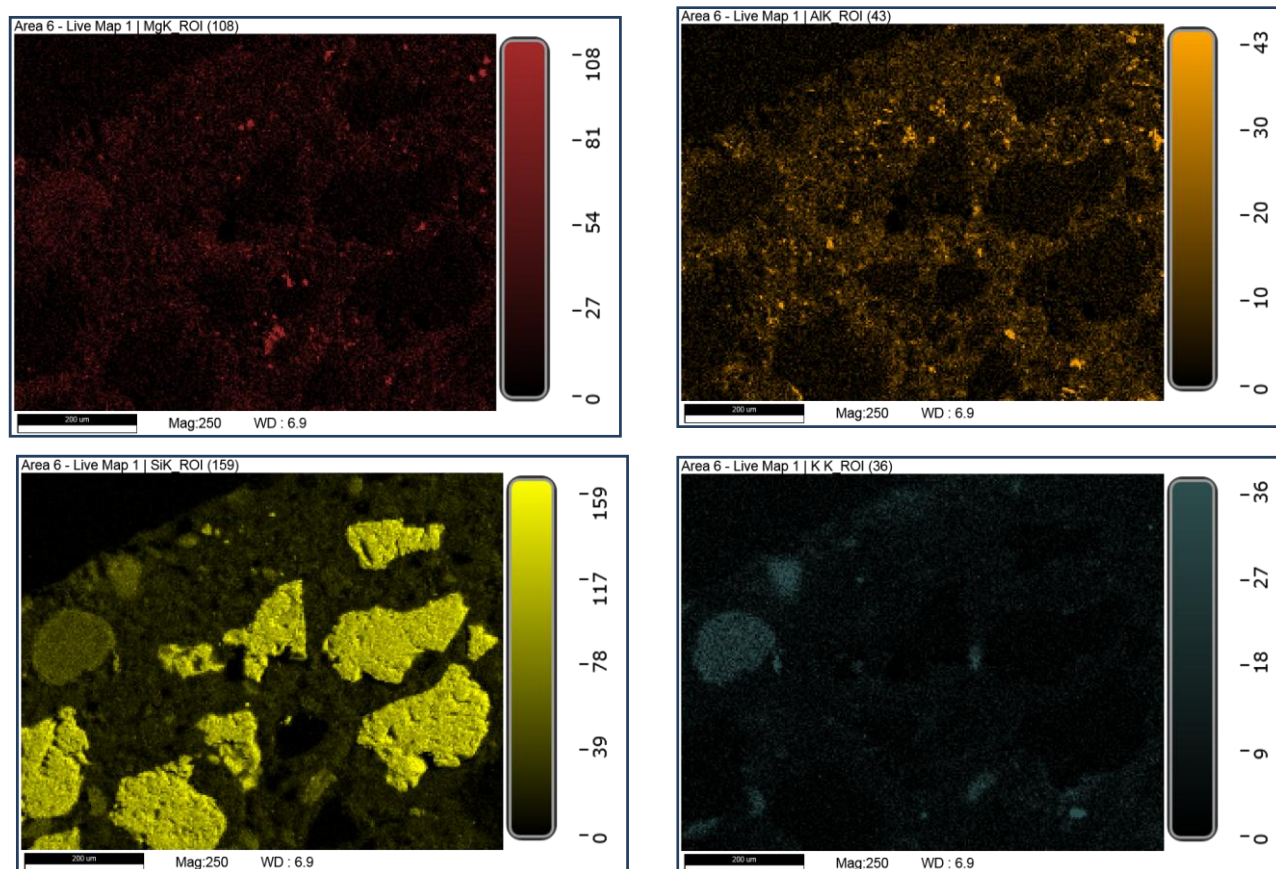
matériau, et ce à l'échelle microscopique. Nous avons choisi la composition BHP70FS pour notre étude microscopique. Les résultats obtenus sont comme suit :

V.4.1 Analyse par MEB/EDS et DRX après l'attaque du béton par le sulfate de magnésium sous l'effet d'une température de 20C° :

La figure V.35 présente le spectre atomique et la cartographie de l'image de BHP70FS attaqué par le sulfate de magnésium. L'image MEB montre l'apparition des microfissures au niveau de la pâte, au niveau des granulats calcaires et à l'interface pâte granulats siliceuses. Les longueurs des microfissures dépassent le 300 µm. L'analyse EDS montre que l'échantillon contient des pics de Ca, O, Si, Al et C qui sont les éléments principaux dans la composition des produits de l'hydratation. On constate l'absence de soufre S dans l'analyse par EDS. L'image par MEB plus de grossissement X6500 présentée dans la figure 05 montre aussi une cristallisation de gel au sein de l'échantillon qui nous pensons que sont de silicium.

Tandis, l'analyse par DRX figure V.36 détecte la cristallisation de sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gypse) et Calcium- Aluminum -oxide sulfite- Hydrate $\text{Ca}_6 \text{Al}_2 \text{O}_6(\text{SO}_3)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ au sein de l'échantillon béton broyé.





Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
O K	56.44	73.42	10.32	150.80	0.8998	0.0402	1.0000
Mg K	1.50	1.28	9.41	17.69	0.9159	0.1735	1.0080
Al K	1.29	0.99	8.43	22.63	0.9194	0.2717	1.0135
Si K	14.12	10.47	6.93	343.66	0.9227	0.3848	1.0107
K K	0.49	0.26	4.75	14.04	0.9371	0.7642	1.0997
Ca K	26.16	13.58	2.66	640.15	0.9396	0.8154	1.0118

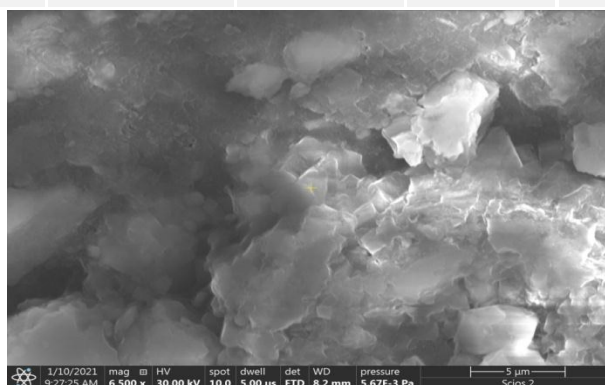
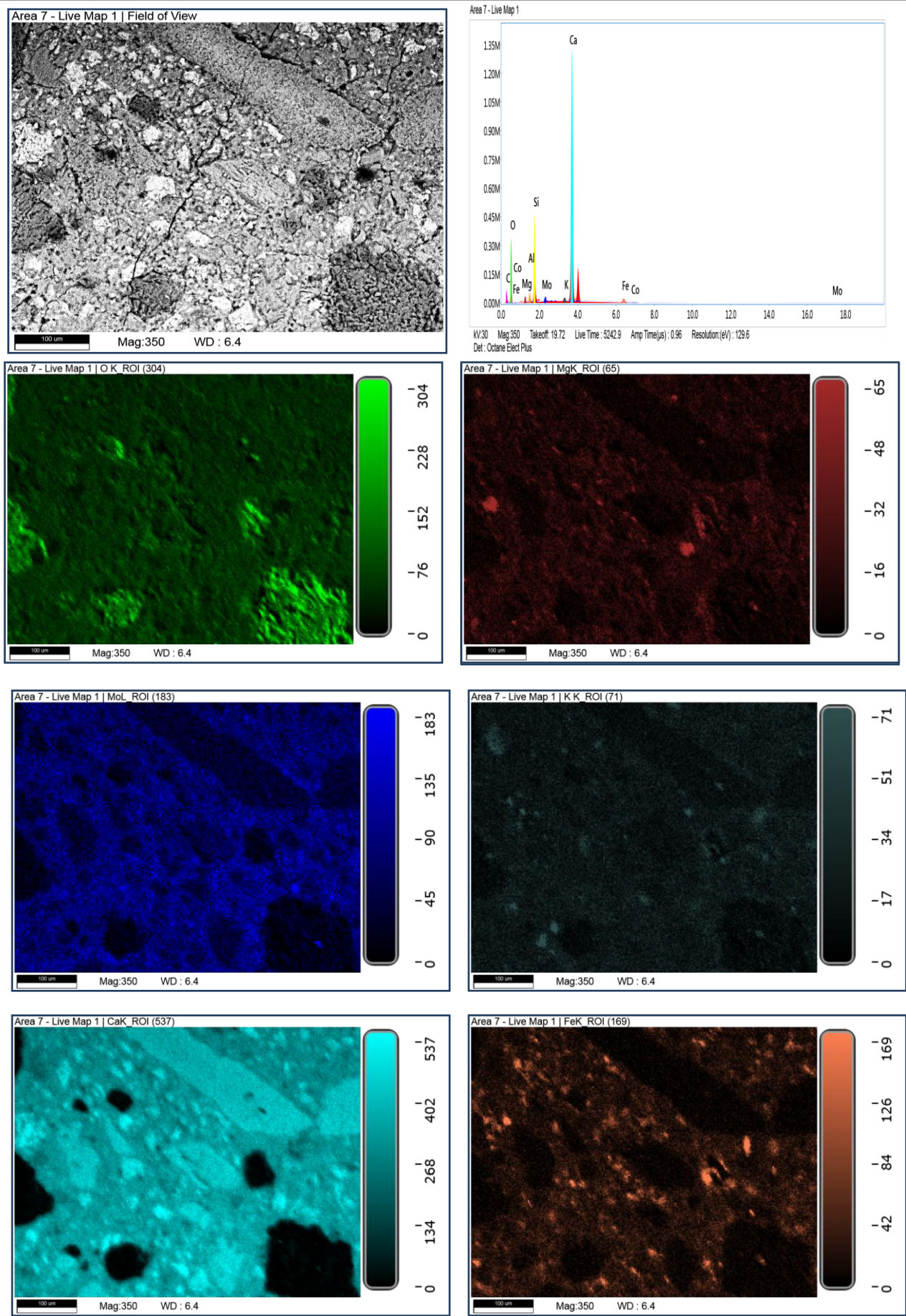
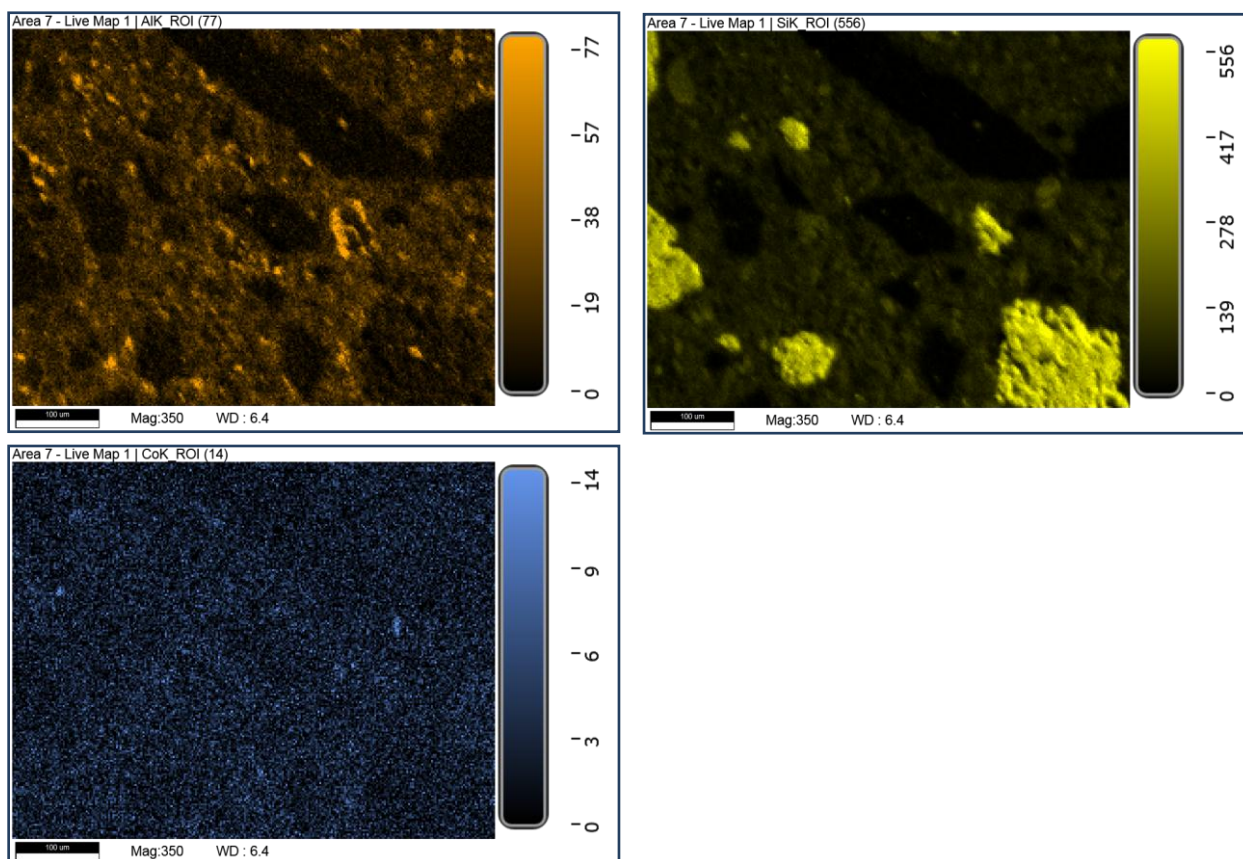


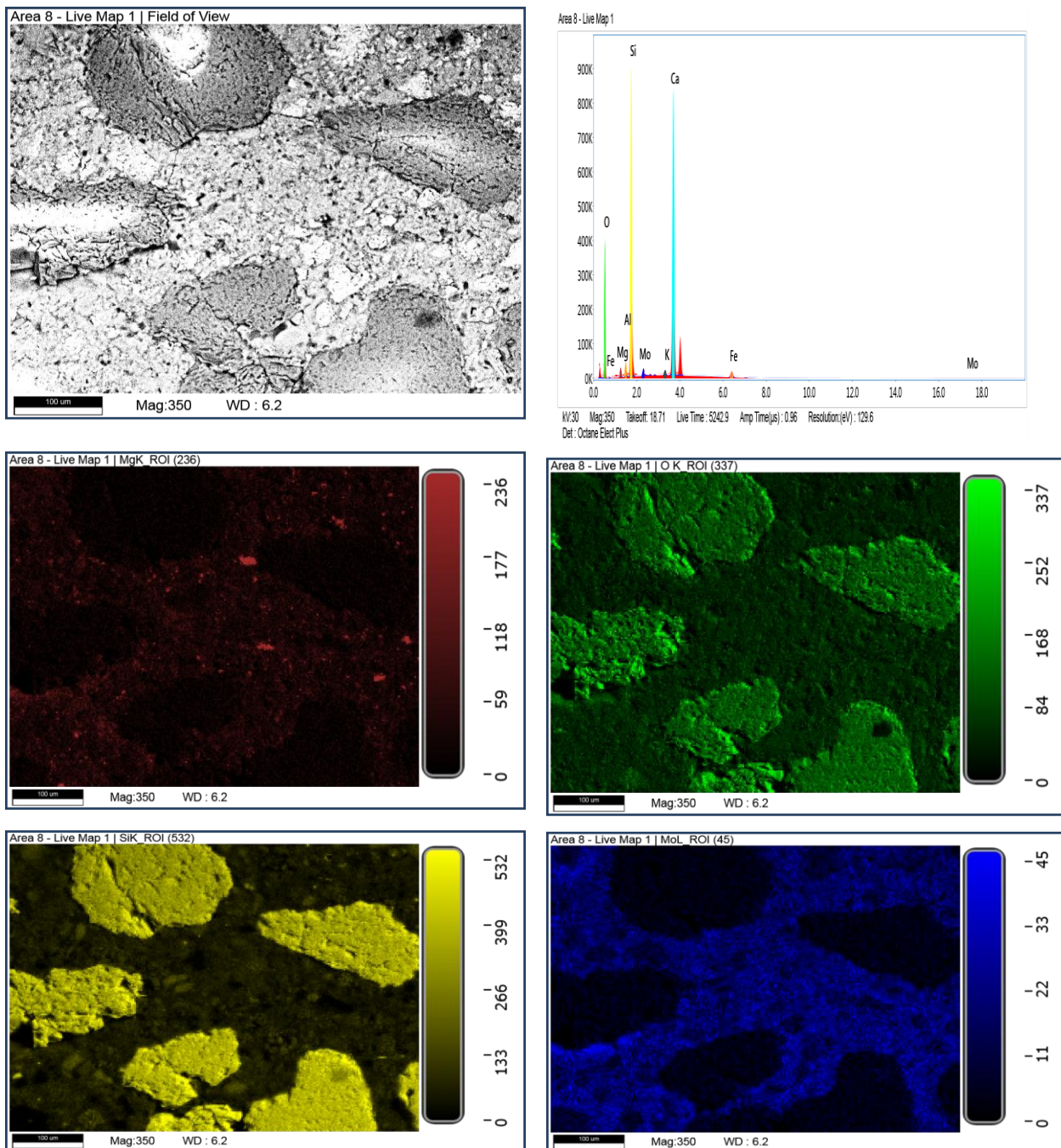
Figure V.35: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS après avoir été immergé pendant six mois dans une solution de 5 % de sulfate de magnésium à une température de 20 °C.

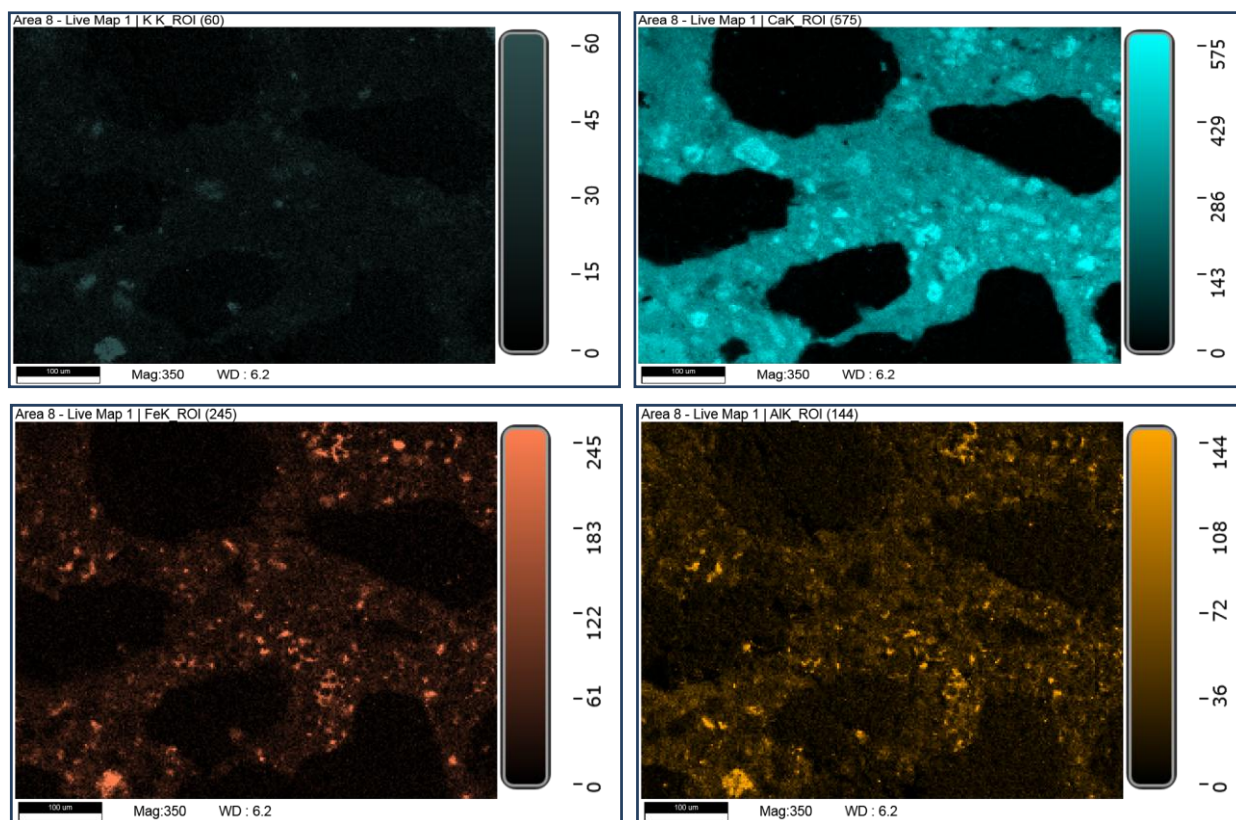




Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
C K	0.04	0.08	51.86	0.25	0.8823	0.0323	1.0000
O K	53.17	72.09	10.34	438.70	0.8933	0.0347	1.0000
Mg K	1.36	1.21	9.25	54.66	0.9100	0.1650	1.0073
Al K	1.35	1.09	8.29	81.25	0.9137	0.2606	1.0122
Si K	9.00	6.95	7.06	759.05	0.9172	0.3712	1.0133
K K	0.36	0.20	4.29	38.44	0.9323	0.7750	1.1221
Ca K	32.91	17.81	2.56	2921.20	0.9350	0.8250	1.0119
Fe K	0.98	0.38	2.61	58.27	0.9495	0.8839	1.0504
Co K	0.01	0.01	28.15	0.83	0.9517	0.9060	1.0629
Mo L	0.81	0.18	5.80	37.56	0.9246	0.5294	1.0152

Al et C qui sont les éléments principaux dans la composition des produits de l'hydratation. En outre, on constate l'absence de soufre S a été remarque dans l'analyse pars EDS. L'image par MEB plus de grossissement X5000 présentée dans la figure V.39 montre une cristallisation très peu de gel au sein de l'échantillon comparativement aux agressions des sulfates sous une température de 20°C et sous l'influence des cycles de gel et de dégel. L'analyse par DRX figure V.40 détecte la cristallisation de silicium SiO_2 , la calcite et Calcium- Aluminum – Silicate- Hydrate (gismondine **F. Stoppa**) $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ au sein de l'échantillon béton broyé. Nous remarquons l'absence totale de l'élément de soufre S dans l'échantillon.





Element	Weight %	Atomic %	Error %	Net Int.	R	A	F
O K	54.88	71.99	10.26	526.07	0.8987	0.0424	1.0000
Mg K	1.25	1.08	9.14	51.29	0.9148	0.1769	1.0085
Al K	1.25	0.97	8.15	76.34	0.9184	0.2775	1.0144
Si K	17.95	13.41	6.83	1506.05	0.9217	0.3913	1.0090
K K	0.36	0.19	4.51	32.98	0.9362	0.7401	1.0789
Ca K	22.66	11.87	2.85	1842.94	0.9388	0.7966	1.0131
Fe K	0.82	0.31	2.55	47.62	0.9527	0.9008	1.0557
Mo L	0.83	0.18	6.88	32.27	0.9288	0.4752	1.0096

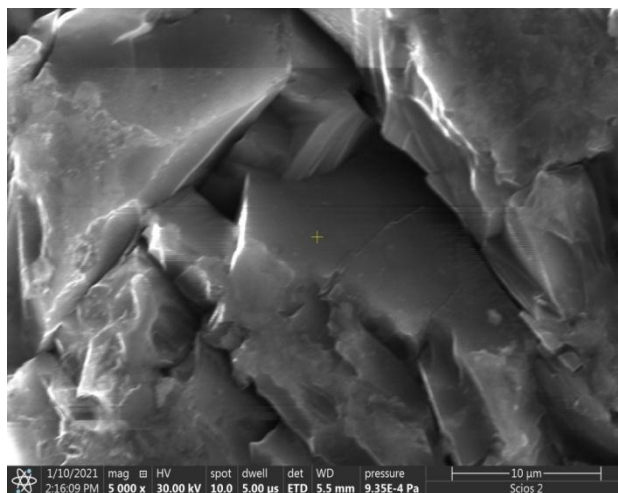


Figure V.39: Observation au MEB accompagné par des analyses par EDS pour l'échantillon BHP 70FS suite à une immersion de six mois dans une solution composée de 5 % de sulfate de magnésium, à une température élevée de 50 °C.

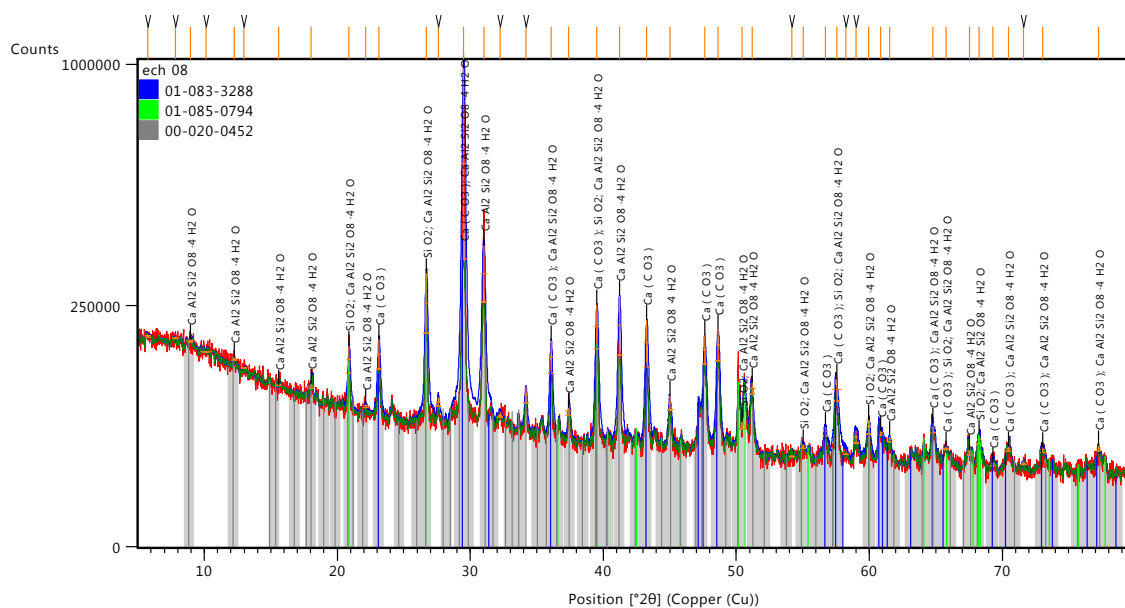


Figure V.40: Analyse par DRX sur l'échantillon BHP 70FS suite à une immersion de six mois dans une solution composée de 5 % de sulfate de magnésium, à une température élevée de 50 °C.

V.5 Synthèse de chapitre :

Résistance chimique aux agressions causées par le sulfate de magnésium MgSO_4 à une température de 20 °C :

La résistance des BHP face aux agressions du sulfate de magnésium MgSO_4 à une température de 20 °C a révélé une augmentation des masses ainsi qu'une réduction de la porosité accessible à l'eau à la fin de teste. Une diminution de la résistance mécanique a été constatée dans l'ensemble des échantillons analysés.

L'application des conditions climatiques, combinée aux essais accélérés sur les agressions causées par le sulfate de magnésium MgSO_4 , a permis de dégager les conclusions principales suivantes. :

Résistance chimique face aux agressions du sulfate de magnésium MgSO_4 sous l'influence des cycles de gel et de dégel:

Les résultats montrent que la résistance mécanique des compositions de BHP aux agressions d'une solution de sulfate de magnésium MgSO_4 , sous l'effet des variations de gel et de dégel, est inférieure à celle des échantillons soumis à une température de 20 °C. En outre, la la porosité accessible à l'eau des échantillons a été constatée comme étant inférieure à celle des échantillons examinés à une température de 20 °C

Résistance chimique face aux agressions du sulfate de magnésium MgSO_4 à une température élevée de 50 °C :

L'analyse de la résistance des BHP aux attaques du sulfate de magnésium MgSO_4 à une température de 50°C montre que les taux d'augmentation de masse des diverses compositions testées sont significativement plus élevés que ceux observés lors de l'attaque par MgSO_4 à 20 °C, ainsi que lors des agressions de MgSO_4 en combinaison avec des cycles de gel et de dégel.

VI.1. Introduction : Ce chapitre se concentre sur l'analyse de la durabilité des bétons à hautes performances, élaborés à partir de granulats calcaires concassés extraits des carrières de la région de Laghouat, ainsi que d'un mélange de deux types de sable, à savoir le sable calcaire concassé et le sable naturel. Des formulations de bétons à hautes performances, avec et sans ajout de fumée de silice, ont été réalisées, et la perméabilité au gaz a été évaluée selon la norme XP P18-463. L'étude de la durabilité des bétons à hautes performances en ce qui concerne la carbonatation est abordée à la fin de ce chapitre.

VI.2. Résultats et discussion :

VI.2.1. Perméabilité au gaz

Les résultats des évaluations de la perméabilité aux gaz des différentes formulations des BHP proposées sont regroupés dans le tableau VI.01 et la figure VI.01, le taux de saturation calculé pour chaque composition voir tableau VI.01 varie entre 24-38% les valeurs de la perméabilité au gaz varie de $3.75.10^{-18}$ - $28.26.10^{-18}$ m². On constate généralement que la perméabilité au gaz décroît lorsque le rapport E/C diminue et que des additions pouzzolaniques, telles que le fumé de silice, sont ajoutées, à l'exception de la composition BHP70FS où K_{gaz} est remarquée supérieure à celle de BHP65.

Tableau VI.01 : Perméabilité au gaz des BHP proposés, résistance moyenne à la compression, taux de saturation, porosité accessible à l'eau.

Composition	Tau de saturation Séchage de 03j à T=80C° Sr en %	Perméabilité au gaz en (10^{-18}) m ²	E/C	E/L	R _{c28j} MPa	R _{c60j} MPa	Porosité accessible à l'eau en %
BHP 80	38	4.97	0.25	0.25	84.26	89.8	7.46
BHP 70	27	20.69	0.30	0.3	72.51	80.89	8.79
BHP 65	24	10.3	0.35	0.35	68.9	75.5	10.07
BHP 85FS	25	3.75	0.27	0.25	86.71	95.48	7.18
BHP 75FS	37	9.61	0.33	0.30	75.62	89.5	8.51
BHP 70FS	35	28.26	0.38	0.35	68.87	76.75	10.44

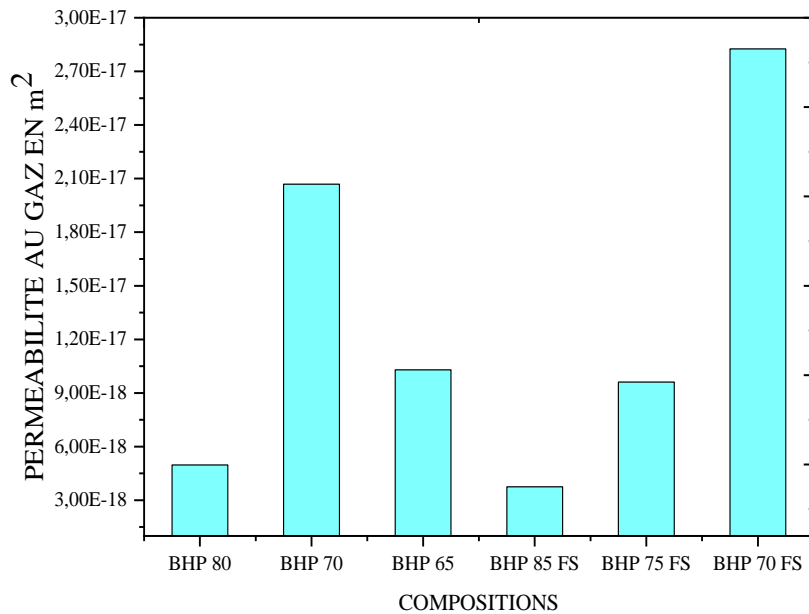


Figure VI.01 : Perméabilité au gaz des six BHP proposés.

VI.2.1.1. Discussion des résultats en fonction des paramètres de formulation :

En tenant compte des résultats démontrés dans le tableau VI.01 et la figure VI.02 on constate une diminution significative du coefficient de perméabilité au gaz a été observée avec l'ajout de fumée de silice, ainsi qu'une diminution du rapport E/C, à l'exception de BHP70FS où la perméabilité mesurée est de l'ordre de $28.26.10^{-18} m^2$ et ceci est peut être expliqué par l'existence des microfissures initiales au sein du matériau ou apparaissent au cours du séchage des échantillons.

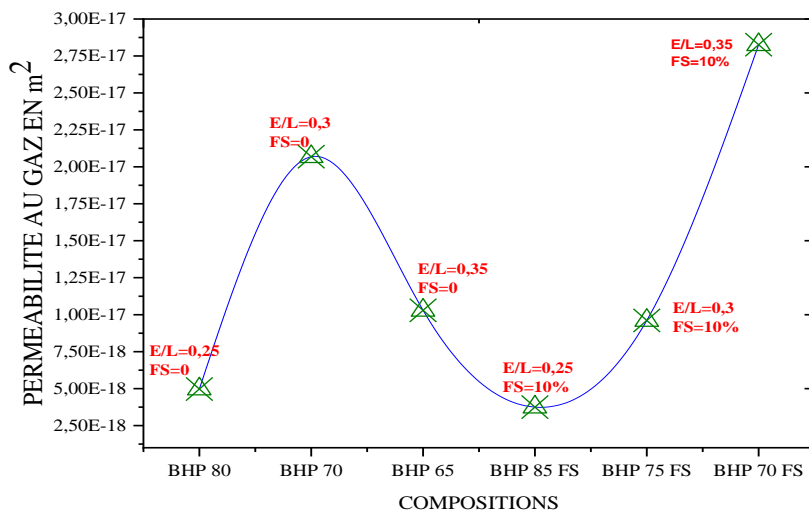


Figure VI.02 : Perméabilité au gaz des BHP proposés avec les paramètres de formulation.

VI.2.1.2. Analyse des résultats en tenant compte des propriétés physico-mécaniques :

Les figures VI.03 et 04 illustrent les valeurs de la perméabilité aux gaz en fonction de la résistance à la compression et de la porosité accessible à l'eau, ces mesures ayant été effectuées à l'âge de 60 jours.

En se basant sur les résultats synthétisées dans les figures VI.09 et VI.10 on constate que la perméabilité au gaz se réduit en fonction de l'accroissement de la résistance à la compression et de la diminution de la porosité, surtout pour les BHP avec ajout de pouzzolane où une résistance mécanique à la compression moyenne 76.75 - 95.48 MPa et la porosité accessible à l'eau 7.18-10.44%. Les valeurs de perméabilité aux gaz K_{gaz} entre $3.75.10^{-18}$ - $28.26.10^{-18} m^2$. En outre, aucune relation directe entre l'évolution de la résistance mécanique et la perméabilité aux gaz n'a été observé pour les BHP sans ajout pouzzolanique.

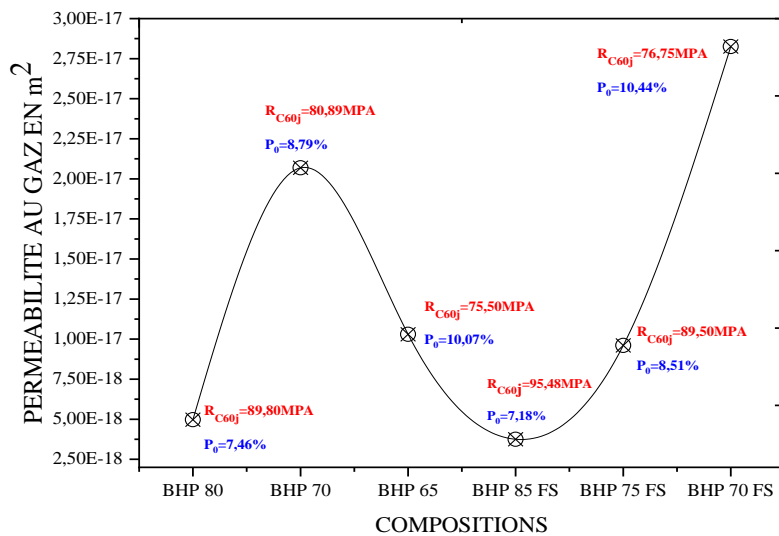


Figure VI.03 : Perméabilité au gaz des six BHP proposés avec les valeurs de la résistance moyenne à la compression et porosité accessible à l'eau.

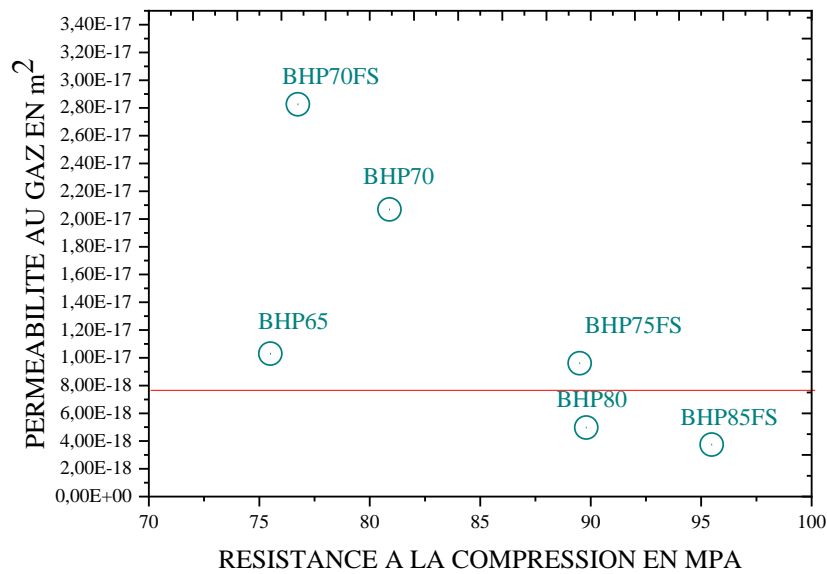


Figure VI.04 : Perméabilité au gaz des six BHP proposés en fonction de la résistance moyenne à la compression.

On peut conclure que non seulement les paramètres de formulation et la résistance mécanique ont une influence directe sur le transfert gazeux et par conséquent la durabilité de matériau dépend d'autres paramètres. **Véronique BAROGHEL-BOUNY [71], [74]** et autres auteurs montrent que la perméabilité au gaz pour un matériau contient initialement des microfissures peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur par rapport à celle du matériau non fissuré.

VI.2.1.3. Etude comparative

Dans ce que suit nous essayons de comparais les résultats obtenus pour notre étude et celle obtenus dans le cadre de projet national français BHP 2000: deux gammes des bétons ordinaires et des BHP.

VI.2.1.3.1 Formulation

Il est impératif, avant de dévoiler les résultats de la mesure de la perméabilité au gaz issus de ce projet, de montrer dans le **tableau VI.02** la formulation et les caractéristiques physico-mécaniques de BHP 2000 tant à l'état frais qu'à l'état durci [67], [70], [71].

Les constituants utilisés pour la formulation des **BHP 2000** sont de : ciment CEM I 52.5, cendre volante silico-alumineuses CV, fumé de silice FS, gravillons calcaires concassés du

CHAPITRE VI : TRANSFERT GAZEUX

Boulonnais 0/5-5/12.5-12.5/20, sable silico-calcaire de Seinz 0/4, superplastifiant SP, retardateur et un agent entraîneur d'air AEA.

Tableau VI.02 : Comparaison des formulations proposées avec les BHP 2000.

Bétons	Gravier 16/20kg/m ³	Gravier 8/16 kg/m ³	Gravier 4/8 kg/m ³	Sable calcaire 0/4 kg/m ³	Sable alluvionnaire 0/4 kg/m ³	Ciment kg/m ³	F.S kg/m ³	Eau kg/m ³	SP Extraire sec kg/m ³	AE A kg/m ³	Retardateur kg/m ³	E/C	E/L	Affaissement en mm
PROJET														
BHP 80	424.01	254.41	381.61	337.81	337.81	570	00	142.5	6.84	0	0	0.25	0.25	230
BHP 70	426.39	255.84	383.75	339.72	339.72	520	00	156	6.24	0	0	0.30	0.3	300
BHP 65	432.05	259.23	388.84	344.22	344.22	470	0	164.5	5.64	0	0	0.35	0.35	300
BHP 85FS	416.93	250.16	375.23	332.17	332.17	513	57	142.5	10.2	0	0	0.27	0.25	230
BHP 75FS	419.93	251.96	377.94	334.56	334.56	468	52	156	9.36	0	0	0.33	0.30	300
BHP 70FS	426.21	255.72	383.59	339.59	339.59	423	47	164.5	8.46	0	0	0.38	0.35	300
PROJET NATIONAL BHP 2000														
Bétons	Gravier 12.5/20 kg/m ³	Gravier 5/12.5 kg/m ³	-	Sable calcaire 0/5 kg/m ³	Sable silico-calcaire kg/m ³	Ciment kg/m ³	F.S kg/m ³	Eau kg/m ³	SP Extraire sec kg/m ³	AEA kg/m ³	Retardateur kg/m ³	E/C	E/L	Affaissement en mm
M75FSEA	550	437		414	408	387	23	132	12.9	0.58	2.9	0.34	0.32	250
M75EA	489	443		338	332	557	0	151	14.8	0.98	3.9	0.27	0.27	265
M75	550	475		407	401	461	0	146	12.4	0	3.3	0.32	0.32	250
M75FS	579	465		442	435	360	22	136	12	0	2.5	0.38	0.36	250
M100FS	561	488		439	432	377	38	124	12.5	0	2.6	0.33	0.3	240
M120FS	554	437		413	407	470	57	124	15.6	0	3.3	0.26	0.23	245

La composition des différents mélanges sont regroupées dans le [tableau VI.02](#).

On constate globalement que les différents constituants des BHP pour notre étude et celle de [BHP 2000](#) sont semblables : granulats d'origine calcaire avec $D_{\max} 20$ mm, ciment CEM I 52.5, fumé de silice, à l'exception de certaines formulations de [BHP 2000](#), où l'on observe l'inclusion d'un retardateur de prise et entraîneur d'air AEA.

VI.2.1.3.2 Résistance mécanique :

Le [tableau VI.03](#) résume l'évolution des résistances mécaniques des différentes compositions à comparées en fonction du temps.

Tableau VI.03 : Comparaison des évolutions de résistance mécanique des formulations proposées avec les [BHP 2000](#).

Bétons	Résistance à la compression en MPa						Résistance à la flexion en MPa
Age	03j	07j	28j	60j	120j	1an	28j
BHP 80	64.59	69.42	84.26	89.8	97.5	102	5.25
BHP 70	58.29	62.87	72.51	80.89	87.8	92.1	5.01
BHP 65	50.02	52.54	68.9	75.5	77	84.2	4.66
BHP 85FS	67.41	80.25	86.71	95.48	99.63	116.93	5.22
BHP 75FS	64.86	69.78	75.62	89.5	94.3	101.7	4.83
BHP 70FS	55.33	65.67	68.87	76.75	82.05	84.34	4.85
Projet National BHP 2000 [67]							
Bétons	03j	07j	28j	90j			
M75FSE A	39.7	51.7	71.7	80.1			
M75EA	52	61.1	79.4	86.3			
M75	54.3	68.8	83.1	91.9			
M75FS	42.9	58.2	81.4	91.0			
M100FS	68.7	86.7	116.1	128.7			
M120FS	89.5	101.0	125.5	139.2			

VI.2.1.3.3 Perméabilité aux gaz

Les valeurs de la perméabilité aux gaz, le degré saturation ainsi les caractéristiques physique-mécanique obtenus dans le cadre projet BHP 2000 [70] et obtenus au cours de notre étude pour les formulations semblables sont regroupées dans le [tableau VI.04](#).

Tableau VI.04: Perméabilité au gaz des BHP proposés, résistance moyenne à la compression, taux de saturation, porosité accessible à l'eau. Comparaison avec les BHP 2000.

Bétons	Tau de saturation Séchage de 03j à T=80C° Sr en %	Perméabilité au gaz en (10^{-18}) m ²	E/C	E/L	R _{c28j} en MPa	R _{c60j} en MPa	Porosité accessible à l'eau en %
PROJET							
BHP 80	38	4.97	0.25	0.25	84.26	89.8	7.46
BHP 70	27	20.69	0.30	0.3	72.51	80.89	8.79
BHP 65	24	10.3	0.35	0.35	68.9	75.5	10.07
BHP 85FS	25	3.75	0.27	0.25	86.71	95.48	7.18
BHP 75FS	37	9.61	0.33	0.30	75.62	89.5	8.51
BHP 70FS	35	28.26	0.38	0.35	68.87	76.75	10.44
PROJET NATIONAL BHP 2000 [70]							
Bétons	Tau de saturation Séchage de 07j à T=80C° S en %	Perméabilité au gaz en (10^{-18}) m ²	E/C	E/L	R _{c28j}	R _{c90j}	Porosité accessible à l'eau en %
M75FSEA	47	33	0.34	0.32	71.7	80.1	10.3
M75EA	38.2	108	0.27	0.27	79.4	86.3	10.7
M75	38.8	13	0.32	0.32	83.1	91.9	11.5
M75FS	44.6	19	0.38	0.36	81.4	91.0	10.0
M100FS	34.7	3.95	0.33	0.3	116.1	128.7	8.4
M120FS	29.1	9.85	0.26	0.23	125.5	139.2	7.4

Selon les résultats représentés dans la [figure V.05](#) on remarque que les valeurs de K_{gaz} mesurées dans le cadre de l'étude BHP 2000 entre $3.95 \cdot 10^{-18}$ - $108 \cdot 10^{-18} \text{m}^2$, un taux de saturation de 29.1-47%. Tandis que, les valeurs de K_{gaz} mesurées pour notre étude est de $3.75 \cdot 10^{-18}$ - $28.26 \cdot 10^{-18} \text{m}^2$ avec un taux de saturation 38-24%.

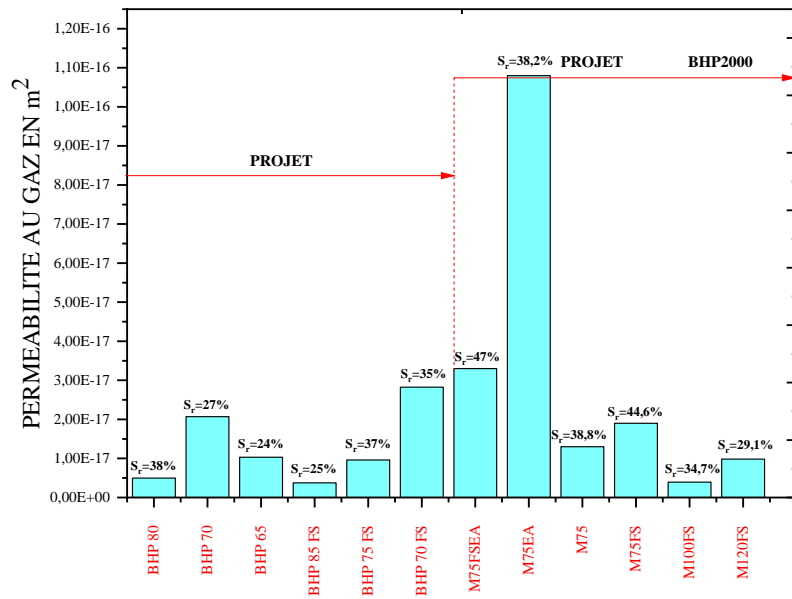


Figure VI.05 : Perméabilité au gaz des BHP proposés et BHP 2000

On constate aussi que la perméabilité au gaz minimale a été observée pour notre composition **BHP85FS** $K_{\text{gaz}} = 3.75.10^{-18} \text{ m}^2$ ce qui représente une faible aptitude au transfert gazeux au sein de ce BHP. La valeur maximale a été remarquée pour la composition **M75EA** établi dans le cadre de projet **BHP 2000** la valeur de K_{gaz} atteint 108.10^{-18} m^2 ce BHP apparaît un mauvais classement cette situation peut être expliquée par la présence des microfissures, qui influencent la perméabilité au gaz.

La figure VI.06 illustre le classement des douze BHP en fonction de leur perméabilité au gaz et de leur résistance mécanique à la compression.

La première observation que l'on peut faire à partir de ce classement c'est que les six BHP établis dans le cadre de notre étude ont été classés dans les deux zones à faibles valeurs de perméabilité, dont quatre BHP classés dans la **zone I** où la perméabilité ne dépasse pas $10.3.10^{-18} \text{ m}^2$ et deux BHP classés dans la zone II où la perméabilité au gaz ne dépasse pas 28.10^{-18} m^2 . Tandis les BHP formulés dans le cadre de projet BHP 2000 ; trois BHP classés dans la **zone I** ; deux BHP classés dans la **zone II** et un BHP classé dans la **zone III** (M75 EA). Cette étude comparative nous a montré que pour deux compositions à résistance mécanique semblables BHP85FS (notre étude) et M75FS (BHP2000) la valeur de la perméabilité au gaz BHP85FS est 5 fois inférieure à M75FS.

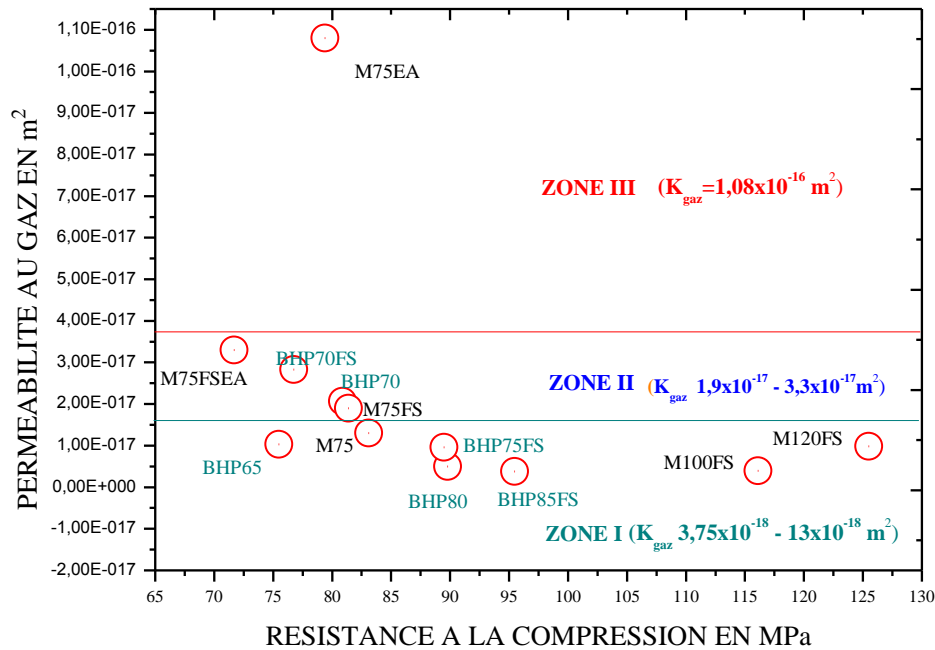


Figure VI.06 : Comparaison de la Perméabilité au gaz des BHP proposés et les BHP 2000 en fonction de la résistance moyenne à la compression.

VI.2.2. Carbonatation :

VI.2.2.1. Mesure de la profondeur de la carbonatation des BHP :

La figure VI.07 illustre l'apparence des éprouvettes à la conclusion de l'essai de carbonatation, après l'application d'une solution de 1 % de phénolphthaléine, à l'âge de 28 jours et de 120 jours.

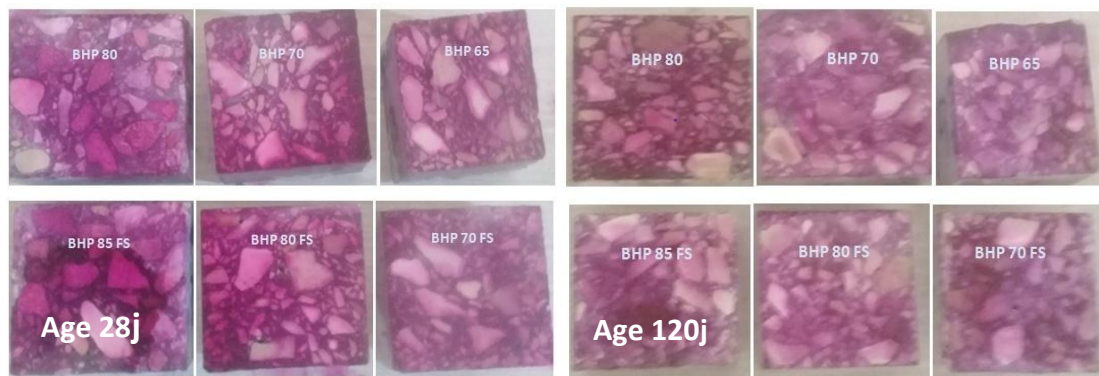


Figure VI.07 : Détermination de la profondeur de carbonatation en pulvérisant une solution de 1 % de phénolphthaléine à 28 jours, puis à 120 jours.

Tableau VI.05 : profondeur de carbonatation h_c mesurée à différentes âges.

Compositio n	h_c à 7j en mm	h_c à 14j en mm	h_c à 28j en mm	h_c à 120j en mm
BHP 80	0	0	0	0
BHP 70	0	0	0	0
BHP 65	0	0	0	0
BHP 85FS	0	0	0	0
BHP 75FS	0	0	0	0
BHP 70FS	0	0	0	0
h_c : profondeur carbonaté				

Selon les résultats illustrées dans la figure VI.07 et le tableau VI.05, aucune carbonatation n'a été détectée (profondeur carbonaté remarqué nul) pour les différentes compositions des BHP testées, ceci est expliqué par leurs excellentes résistance à la pénétration du CO_2 à l'intérieur des échantillons des BHP élaborés dans cette recherche.

VI.2.3. Synthèse de chapitre :

L'évaluation de la perméabilité au transfert gazeux des formulations de BHP a abouti aux conclusions principales suivantes:

Des valeurs de perméabilité au gaz relativement faibles ont été observées, et ce, pour des taux de saturation n'excèdent pas le 38%. La perméabilité au gaz varie de $3.75.10^{-18}$ à $28.26.10^{-18} \text{ m}^2$. Ces valeurs réduites indiquent une faible capacité de transfert des divers agents agressifs à travers le matériau, ce qui contribue ainsi à prolonger sa durée de vie

L'analyse des résultats indique que la variation de la perméabilité au gaz dans les BHP est influencée par plusieurs facteurs, notamment les paramètres de formulation tels que le rapport E/C et l'ajout de matériaux pouzzolaniques comme le fumé de silice. De plus, les caractéristiques physiques et mécaniques jouent un rôle important où la perméabilité au gaz diminue avec la réduction du rapport E/C et de la porosité, ainsi qu'avec l'introduction de fumé de silice et l'augmentation de la résistance mécanique, à condition que le matériau des BHP ne présente pas de microfissures initiales.

L'étude comparative des résultats obtenus durant notre étude et celles obtenus dans le cadre du projet National Français BHP 2000 nous permet de constater ce que suit :

Comparaison des deux compositions à résistance mécanique semblables sans fumé de silice :

Il a été observé que la perméabilité au gaz du BHP 80, préparé dans le cadre de notre étude,

est inférieure de 2,6 fois comparativement de M75 élaboré dans le cadre du projet National Français BHP 2000.

Comparaison des deux compositions à résistance mécanique semblables avec fumé de silice :
La perméabilité au gaz de la composition BHP 85 FS a été mesurée et se révèle être cinq fois inférieures la perméabilité de M75 FS et ceci malgré que le taux de saturation de M75 FS est presque le double 44.6%.

Une excellente résistance à la carbonatation a été remarquée pour toutes les compositions de BHP ou la profondeur carbonatée est nul.

Conclusion générale :

A l'issue de cette recherche on peut tirer les principaux résultats obtenus comme suit :

1. Formulation des bétons à hautes performances :

Les divers mélanges granulaires élaborés pour établir la compacité maximale à l'état sec comprennent des mélanges binaires, des mélanges ternaires, des mélanges quaternaires et des mélanges quintuples. La valeur maximale de la compacité atteint **78.84%** avec un rapport G/S égal à 1.5 a été obtenue pour un mélange quaternaires qui composé par cinq classes granulaires : deux types de sables ont été employés, dont un type calcaire concassé et l'autre naturel. L'étude du système Liant-superplastifiant montre que la dose de saturation croît avec l'augmentation de la substitution de fumé de silice, le point de saturation du coulis sans fumé de silice étant de 1,2 % par rapport au poids du ciment et 1.8% pour le coulis avec fumé de silice.

- A l'état frais une fluidité très élevée supérieure à **220 mm** a été remarquée dans toutes les compositions de bétons à hautes performances étudiées. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre, notamment dans les régions où la concentration des armatures est particulièrement importante sans l'apparition du phénomène de la ségrégation. En outre, l'étude comparative de nos résultats et celles obtenue dans le cadre du projet National français **BHP 2000**, nous a montré que la maniabilité de nos compositions sont meilleures.
- La résistance à la compression de l'ensemble des compositions est mesurée à l'âge de trois jours de durcissement dépasse le **50 MPa** et atteint **67.41 MPa** c'est-à-dire atteint **77.74%** la résistance mesurée à l'âge de 28 jours de durcissement. Ces valeurs ont été remarqués supérieurs à celles obtenues dans le cadre du projet National français **BHP 2000**.
- La résistance à la compression mesurée après 28 jours de durcissement atteint **84.26 MPa** et dépasse le **100 MPa** à l'âge 360 jours de durcissement, Cela permet de diminuer les sections en béton, ce qui réduit le poids propre de la structure. Cette diminution aide également à réduire les déformations, permettant ainsi d'augmenter les portées. Ces hautes résistances facilitent la création de structures aptes à supporter des charges considérables, notamment des immeubles de grande hauteur, des tours, des tunnels, des installations nucléaires et divers ouvrages d'art.

2. Durabilité aux acides :

Les essais classiques accélérés en laboratoire, réalisés à une température ambiante de 20°C, ne reflètent pas à 100% la réalité de la durabilité aux attaques chimiques, notamment les attaques par les acides sans prendre en considération la combinaison des effets climatiques. A cet effet, il est nécessaire d'améliorer les essais traditionnels en intégrant les variations climatiques lors de l'évaluation de la durabilité des bétons. La recherche actuelle se concentre sur l'analyse de la durabilité des bétons haute performance, tant ceux contenant de la fumée de silice que ceux qui n'en contiennent pas, face aux effets de mélanges d'acides sulfurique H_2SO_4 et acétique CH_3COOH sous l'effet des cycles de gel et de dégel, ainsi que l'exposition à des températures élevées atteignant 50°C.

- La résistance chimique des différents BHP aux attaques des acides dans les différents protocoles proposés a été déterminée par le suivi des pertes relatives de masses, résistance mécanique, étude macroscopie (profondeur altérée, porosité et vitesse du son) et en fin une étude microscopique comporte: une analyse par diffraction des rayons X et analyse par MEB/EDS.
- Les résultats expérimentaux nous ont montrés que les bétons à hautes performances (BHP) présentent une excellente résistance à la compression face aux agressions de l'acide acétique. Les propriétés physico-mécaniques sont légèrement influencées par l'attaque de l'acide acétique. Contrairement, l'étude de la durabilité des BHP aux attaques par l'acide sulfurique et le mélanges des deux acides (acétique et sulfurique) a montrer une modification remarquable dans les propriétés initiales des BHP, en particulier, en ce qui concerne la résistance à la compression, il est essentiel de prendre en compte les variations observées. Les résultats des essais montrent des pertes relatives de masse significatives à l'issue des tests, elles sont presque le double comparativement aux attaques par l'acide sulfurique et six fois supérieur comparativement aux attaques par l'acide acétique. L'étude réalisée par diffraction des rayons X a révélé la présence de sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, communément connu sous le nom de gypse au sein des échantillons après l'attaque par l'acide sulfurique et après l'attaque par un mélange des acides sulfurique et acétique. Le gypse se forme à la suite des réactions chimiques entre la portlandite et la calcite en présence d'acide sulfurique.

L'évaluation des BHP contre les agressions acides combinées aux conditions climatiques nous a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- a. **Attaque des mélanges d'acides combinés aux effets des cycles gel/dégel :** La résistance aux attaques combinées des acides sous l'effet cycles gel/dégel des BHP testées a été remarquée meilleure aux BHP testés sous une température de 20°C, notamment les caractéristiques physiques porosité accessible à l'eau et la vitesse du son.
- b. **Attaque des mélanges d'acides combinés à un effet d'une haute température de 50°C:** L'étude de la durabilité des BHP aux attaques par un mélange d'acides combinés à une température élevée de 50°C, indique que les variations de masses observées sont inférieures à celle obtenues par l'attaque d'acides sous une température de 20°C; d'autres caractéristiques physiques et mécaniques, notamment la porosité et la résistance mécanique à la compression, présentent des valeurs plus élevées comparativement aux résultats obtenues pour les échantillons testés à une température de 20°C, il est à noter que l'augmentation de la température a entraîné une accélération de la vitesse de dégradation.
- c. L'examen de la microstructure de divers échantillons a été réalisé sur quelques échantillons par DRX nous a montré la cristallisation de sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gypse) dans les différents protocoles utilisés. L'attaque par un mélange d'acides combinés aux cycles de gel/dégel montre la cristallisation de sulfate d'Aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$. Les proportions des gels cristallisés ont été remarqués très faibles comparativement aux autres protocoles, ceci justifie les propriétés physico-mécaniques les plus remarquables des BHP ont été observées à l'issue des tests de durabilité face aux mélanges acides, en tenant compte des effets des cycles de gel et de dégel.
- d. L'analyse par diffraction des rayons X des échantillons exposés à un mélange d'acides à une température élevée de 50°C a révélé la formation de cristaux de sulfate de calcium, également connu sous le nom de gypse, avec la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Les résultats montrent aussi que les échantillons testés à une température de 50 °C présentent une intensité des pics supérieure, et ce peut être expliqué, par l'accélération des réactions chimiques sous une température élevée, et qui provoqué un endommagement dans le BHP et par conséquent une diminution de ces caractéristiques mécaniques, qui ont été observées supérieures aux autres protocoles.

3. La résistance chimique aux agressions causées par le sulfate de magnésium MgSO_4 :

L'étude de la résistance des BHP face aux agressions du sulfate de magnésium MgSO_4 à une température de 20°C a révélé une élévation des taux de variation des masses. Il a été observé que le taux d'augmentation des masses pour les compositions sans fumée de silice était supérieur à celui des compositions contenant de la fumée de silice. D'après les résultats le taux maximal atteint 0.8% . L'augmentation du poids et la réduction de sa porosité peut être interprété par la masse des nouveaux éléments se forment à la suite des réactions chimiques, qui se produisent entre les produits de l'hydratation et les sulfates. Une réduction de la porosité accessible à l'eau, le taux de diminution atteint le 2% . Une réduction de la résistance mécanique a été observée dans l'ensemble des échantillons testés. Les taux de diminutions maximales ont été remarqués dans les échantillons sans FS, les valeurs observées se situent autour de 12% .

L'influence des cycles de gel et de dégel, ainsi que l'exposition à des températures élevées atteignant 50°C : il a été constaté que l'application des conditions climatiques aux attaques du sulfate de magnésium MgSO_4 sur les BHP à un effet significative, en particulier en ce qui concerne le taux d'augmentation des masses des diverses compositions de BHP, et la porosité accessible à l'eau sous l'effet des cycles gel/dégel ont été remarquées minimales comparativement aux spécimens examinés les conditions climatiques de 20°C et 50°C . A 50°C , le taux d'augmentation des masses et le taux de diminution porosité accessible à l'eau ont été observés supérieures comparativement aux autres protocoles, ceci peut être dû à l'augmentation de la température qui entraîne une accélération des réactions chimiques, ce qui se traduit par une production accrue de sels. Cette élévation de la température favorise non seulement la vitesse des réactions, mais elle contribue également à la formation de sels en plus grande quantité.

4. Perméabilité au gaz :

Les valeurs de la perméabilité au gaz, notées K_{gaz} , ont révélé que cette dernière est influencée par divers facteurs, notamment les paramètres de formulation tels que le rapport E/C et l'ajout de fumée de silice, ainsi que par les propriétés physiques et mécaniques des matériaux. Il a été observé que les valeurs de K_{gaz} diminuent avec l'augmentation de la résistance à la compression et la réduction de la porosité, en particulier pour les bétons à haute performance (BHP) contenant de la fumée de silice, qui présentent la meilleure résistance mécanique à la

compression. Ces résultats soulignent l'importance des choix de formulation et des matériaux dans l'optimisation de la perméabilité aux gaz, mettant en évidence la relation directe entre la résistance mécanique et les caractéristiques de porosité des compositions étudiés.

Les valeurs de perméabilité aux gaz K_{gaz} entre $3.75.10^{-18}$ à $28.26.10^{-18} \text{ m}^2$.

Une comparaison des résultats pour des compositions à résistance mécanique semblables sans et fumé de silice obtenus durant notre étude et celles obtenus dans le cadre du projet National Français BHP 2000, nous permet de constater ce que suit : il a été remarqué que la valeur de la perméabilité au gaz de BHP 80 est 2.6 fois inférieures comparativement de M75 élaboré dans le cadre du projet National Français BHP 2000, Ainsi, pour des mélanges contenant du fumé de silice, la perméabilité au gaz de la composition BHP 85 FS est cinq fois inférieure la perméabilité de M75 FS et ceci, malgré que le taux de saturation de M75 FS est presque le double 44.6%.

5. Carbonatation :

Une excellente résistance à la pénétration du CO_2 aux seins des échantillons des BHP testées, dont aucune profondeur carbonatée n'a été détectée pour les différentes compositions des BHP.

Perspectives :

Enfin, cette étude a contribué de manière significative à l'avancement de notre compréhension du comportement du béton à haute résistance dans des milieux acides, mélange d'acides acétique et sulfurique ainsi au sulfate de Magnésium sous l'influence des conditions climatiques. Les résultats indiquent que notre BHP sous une température de 20C° offre une meilleure résistance face à l'acide sulfurique que d'autre recherches sur la durabilité des BHP aux acides notamment l'acide sulfurique. Cela est dû à sa performance mécanique, sa structure dense et sa faible perméabilité aux gaz. D'autres recherches devraient être menées sur les points suivants:

1. L'extension du domaine de recherche concernant d'autres types de sulfates et d'acides, en particulier la simulation de l'effet des pluies acides sur un BHP;
2. Etudier le comportement des BHP sous l'effet des hautes températures.
3. Etudier la durabilité des BHP avec ajouts binaires, ternaires etc...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ACI. 363 R-92 (1993)** State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, Materials and general properties of concrete. 55p.
- [2] **PIERRE-CLAUDE AITCIN**, bétons à haute performance, édition EYROLLES 1998.
- [3] Les bétons à hautes performances, **LCPC** 1992.
- [4] **FRANÇOIS DE LARRARD, FRANÇOIS BOSC, CYRILLE CATHERINE, FREDERIC DEFLORENNE**, la nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, bulletin de liaison des laboratoires ponts et chaussées, **202**, mars-avril 1996, PP 61-69
- [5] **François de LARRARD et Véronique BAROGHEL-BOUNY**, Vieillissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXI^e siècle : I-Généralités et caractéristiques mécaniques initiales des bétons, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées -225-mars-avril 2000, PP51-65.
- [6] **SEDRA NT, de LARRAR DF**, (1994), **RENé-LCPC**, Un logiciel pour optimiser la granularité des Matériaux de génie civil, Note technique, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 194- Novembre-Décembre.
- [7] **François de LARRARD et Véronique BAROGHEL-BOUNY**, Vieillissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXI^e siècle : II- caractérisation microstructure sur éprouvettes de bétons de résistance 25 à 120 MPa, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 228-Septembre-Octobre 2000, PP71-86.
- [08] **RILEM TC 211 – PAE**, “Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 – PAE”, Eds, M. Alexander, A. Bertron, and N. De Belie, Vol .10, 2013, 462 pp.
- [09] **Zivica.V, and A. Bajza**, “Acidic attack of cement based materials — a review: Part 1. Principle of acidic attack”, Construction and Building Materials, Vol. 15, No. 8, 2001, pp. 331–340.
- [10] **ADAM M. NEVILLE**, Propriétés des bétons, édition Eyrolles, Paris1992.
- [11] Cours de l'université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton.
- [12] **Monteny, J., Vineke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., and Verstraete, W. 2000.** Chemical, microbiological, and in-situ test methods for biogenic sulphuric acid corrosion of concrete. Cement and Concrete Research 30(4): pp. 623-634.
- [13] **N. De Belie, M.Debruyckere, D. Van Nieuwenburgs, B. De Blaeres**, Attack of concrete floors in Pig Houses by feed acids: Influence of Fly Ash addition and cement – bound surface layers, journal of Agricultural engineering Research, Mai 1997, PP: 101-108.
- [14] **Achoura. D, Lanos.Ch, Jauberthie. R , Redjel. B**, Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hauts fourneaux sur la résistance des mortiers enmilieu acide, J. Phys. IV France, 118, 2004, 159-164.
- [15] **A. Bertrona, J. Duchesne, G. Escadeillas**, Accelerated tests of hardened cement pastes alteration by organic acids: analysis of the pH effect, Cement and Concrete Research 35 (2005), PP: 155–166.
- [16] **Véronique Baroghel – Bourry, 2004**, les spécifications des bétons à hautes performances, caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de Laboratoire ou en conditions naturelles, septembre 2004 : étude de recherche de LCPC.
- [17] **S TURKEL, B FELEKO, GLU and S DULLUC**,Influence of various acids on the physico–mechanical properties of pozzolanic cement mortars,Sadhana Vol. 32, Part 6, December 2007, pp. 683–691. © Printed in India.
- [18] **Shweta Goyal, Maneek Kumar, Darshan Singh Sidhu, Bishwajit Bhattacharjee**, Rsistance of mineral admixture concrete to acid attack, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.7, No. 2, 273-283, June 2009.
- [19] **Steeves Lurreur-Cayol et al, June 2009**, Resistance of Mineral admixture concrete to Acid attack, Journal of Advanced Concrete Technology N°2, PP: 273-283.
- [20] **Djerfaj. N**, Optimisation de la formulation de bétons à base de sable concassés de la région de Laghouat, thèse de Magister, université de Laghouat 2012.

- [21] **Y.F. Fan, Z.Q. Hu and H.Y. Luan**, Deterioration of tensile behavior of concrete exposed to artificial acid rain environment, *Interaction and Multiscale Mechanics*, Vol. 5, No. 1 (2012) pp. 41-56.
- [22] **R. Sri Ravindrarajah**, Acids attack on silica fume high-strength concrete, Centre for Built Infrastructure Research, University of Technology, Sydney, Australia Conference Paper · December 2012.
- [23] **Quoc Tri Phung , Norbert Maes , Diederik Jacques , Geert De Schutter , Guang Ye**, Decalcification of cement paste in NH_4NO_3 solution: microstructural alterations and its influence on the transport properties, *Proc. of the 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering* July 21 to 23, 2014, University Laval, Québec, Canada.
- [24] **A. Jayaranjini et al**, April 2016, Durability properties of high performance concrete using industrial by products, *ARNP Journal of engineering and applied sciences*, April 2016, PP: 4370-4381.
- [25] **Salim Barbhuiya * and Davin Kumala**, Behaviour of a Sustainable Concrete in Acidic Environment, *Sustainability* 2017, 9, 1556; doi:10.3390/su909155.
- [26] **R. Deepiya et al**, April 2018, strength and durability of High performance concrete using Metakaolin, *International Journal of science, Engineering and Management (IJSEM)*: April 2018, PP: 582-587.
- [27] **V Pavlík**, Acid attack on hardened cement paste by acids forming low soluble calcium salts, XXV International Conference and Meeting of Departments, *Construmat 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 549(2019) 012020 IOP Publishing.
- [28] **M.T. Bassuoni, M.L. Nehdi**, Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1070–1084.
- [29] **M.N.N. Khan, J.C. Kuri, P.K. Sarker**, Sustainable use of waste glass in alkali activated materials against H_2SO_4 and HCl acid attacks, *Clean Eng Technol* 6 (2022), 100354, <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100354>.
- [40] **Ginette Arliguie et Hugues Hornain, GranDuBé**: grandeurs associées à la durabilité des bétons, Presse pont et chaussées France 2007.
- [41] **Aimin Xu, Ahmad Shayan and Pud Baburamani**, Test methods for sulfate resistance of concrete and mechanism of sulfate attack, *ARRB Transport Research Ltd Review Report* 5 September 1998.
- [42] **E.E Hekal, E.Kishar, H. Mostafa**, Magnesium Sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1421-1427.
- [43] **J. Zeli, R. Krstulovic, E. Tkalcec, P. Krolo**, Durability of the hydrated limestone-silica fume Portlandcement mortars under sulphate attack, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 819–826.
- [44] **Gaowen Zhao, Mei Shi**, Mengzhen Guo and Henghui Fan⁴, Degradation Mechanism of Concrete Subjected to External Sulfate Attack: Comparison of Different Curing Conditions, *Materials* 2020, 13, 3179; doi:10.3390/ma13143179.
- [45] **Frank Rendell, Raoul Jauberthie**, The deterioration of mortar in sulphate environments, *Construction and Building Materials* 13 1999 321]327.
- [46] **Ibrahim Messaoudene, Laurent Molez**, Influence de l'eau de barrage sur la durabilité du béton. 37èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC - Vers des ouvrages intelligents, Jun 2019, Nice. France. hal-02351791.
- [47] **Stephen O. EKOLU and Adam NGWENYA**, Sulphate corrosion behaviour of high volume slag concrete, *Construction Materials and Structures*. IOS Press, 2014 IOS Press, 2014 doi:10.3233/978-1-61499-466-4-788.
- [48] **M Vijaya Sekhar Reddy, I V Ramana Reddy, K Madan Mohan Reddy, M CNataraja and N Krishna Murthy**, durability aspects of high performance concrete containing supplementary cementing materials, *Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.* 2012.
- [49] **B. B. Patil, P. D. Kumbhar**, Strength and Durability Properties of High Performance Concrete incorporating High Reactivity Metakaolin, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* Vol.2, Issue.3, May-June 2012 pp-1099-1104 ISSN: 2249-6645.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [50] **L. Laoufi 1***, **Y. Senhadji1**, **A. Benazzouk2**, **T. Langlet2**, **M. Mouli3**, **I. Laoufi1**, **A. S. Benosman**, 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) (2016) 1835-1845. ISSN : 2028-2508 CODEN: JMESC.
- [51] **BIER T.A. LUDIRDJ AD, YOUN G.J.F .BERGE RR.L. (1989)**, The effect of pore structure and cracking On the permeability of concrete, MRS Boston, vol.137,pp.235-241.
- [52] **MEHTA P.K. (1991)**. Durability of concrete-Fifty years of progress, ACI, SP-126, pp.1-31.
- [53] **KLINKENBERG L.J. (1941)**, The permeability of porous media to liquids and gases, API Drilling And Production Practices, pp.200-213.
- [54] **Véronique BAROGHEL-BOUNY et al**, Etude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges : I-Microstructures, propriétés de durabilité et retrait, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 217, septembre-octobre 1998, pp.61-73.
- [55] **ZINE EL-ABIDINE KAMECHE, FOUAD GHOMARI et al**, la perméabilité relative aux: une propriété de transport importante contrôlant la durabilité du béton partiellement saturé, MATEC Web of Conferences 11,01020 (2014).
- [56] **Véronique BAROGHEL-BOUNY et al**, Vieillissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXI^e siècle III – Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 241, Novembre-Décembre 2002, pp.13-59.
- [57] **Tsimbrovska M.**, Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées. Evolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure, Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, 1998.
- [58] **Wei CHEN**, thèse de doctorat, Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables, Université Lille Nord-de-France, décembre 2011.
- [59] **La norme XP—P18-463, Novembre 2011** : Essai de perméabilité au gaz sur béton durci.
- [60] **Klinkenberg L.J.**, The permeability of porous media to liquid and gaz, American Petroleum Institute, Drilling and Production Practice, pp. 200-213, 1941.
- [61] **Verdier J.**, Contribution à la caractérisation de l'évolution du taux de fuite des enceintes de confinement du parc nucléaire, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2001
- [62]**Véronique BAROGHEL-BOUNY** : Les spécificités des bétons à hautes performances, caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions des laboratoires ou en conditions naturelles. LCPC OA44 2004.
- [63] **Akli YOUNSI**, thèse de doctorat, Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales, université de la rochelle 2011.
- [64] **Ngoc Tru VU**, Thèse de DOCTORAT, Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE 2011.
- [65] **Véronique BAROGHEL-BOUNY, Josette GAWSEWITCH, Patrick BELIN, Karim OUNOUGH, Sylvie ARNAUD, Gérard OLIVIER, Benoît BISSONNETTE**, Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle, IV. Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure, BULLETIN DES LABORATOIRES DESPONTS ET CHAUSSÉES- 249 MARS-AVRIL2004 - RÉF. 4507 - PP. 49-10.
- [66] **Joanna Witkowska-Dobrev, Olga Szlachetka, Marek Dohojda and Krzysztof Wiśniewski**, Effect of Acetic Acid on Compressive Strength and Geometric Texture of the Surface of C20/25 Class Concrete, Sustainability 2021, 13, 5136. <https://doi.org/10.3390/su13095136>.
- [67] **M.R. Ahmad, B. Chen, S.F.A. Shah**, Influence of different admixtures on the mechanical and durability properties of one-part alkali-activated mortars, Constr. Build. Mater. 265 (2020), 120320, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120320>.
- [68] **Sayed, A. E. and Mohamed, R. A. S.** Effect Of Cement Content And Cement Type On The Resistance Of Concrete Against Chemical Attack, Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 37, No. 1, pp. 1 -16 , January 2009.

- [69] **Diego Jesus de Souza , Marcelo Henrique Farias de Medeiros ,** Juarez Hoppe Filho^c , Evaluation of external sulfate attack (Na₂SO₄ and MgSO₄): Portland cement mortars containing siliceous supplementary cementitious materials, Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 13, no. 4, e13403, 2020| <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000400003>.
- [70] **Xinjun Song, Ying Ma,** Long-term thaumasite sulfate attack on mortar containing coral sand filler and SCMs exposed to sodium sulfate solution, Case Studies in Construction Materials 19 (2023) e02576, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02576>
- [71] **R.P. Khatri, V. Sirivivatnanon, J.L. Yang,** Role of permeability in sulphate attack, cement and concrete Research volume 27, Issue 8, August 1997, Pages 1179-1189, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00119-1).
- [72] **Fatima-Zohra DAKHMOUCHE CHABIL,** Thèse de doctorat, Carbonatation De Bétons Adjuvantes A Base De Ressources Locales Algériennes, Docteur de l'université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine 13 Décembre 2009.
- [73] **Véronique BAROGHEL-BOUNY Thierry CHAUSSADENT,** Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages Bilan de cinq années de recherches et orientations futures BULLETIN DES LABORATOIRES DESPONTS ETCHAUSSÉES – 248 JANVIER-FÉVRIER2004 - RÉF. 4482 - PP. 93-111.
- [74] **E. Hewayde, M. L. Nehdi, E. Allouche and G. Nakhla,** Using concrete admixtures for sulphuric acid resistance, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials 160 February 2007 Issue CM1 Pages 25–35.
- [75] **Sayed, A. E. and Mohamed, R. A. S.** Effect Of Cement Content And Cement Type On The Resistance Of Concrete Against Chemical Attack, Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 37, No. 1, pp. 1 -16 , January 2009.
- [76] Normalisation Française P 18-424, Octobre 1994, Bétons-Essai de gel sur béton durci, gel dans l'eau-dégel dans l'eau.
- [77] **François de LARRARD et Véronique BAROGHEL-BOUNY,** Vieillissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXI^e siècle : I-Généralités et caractéristiques mécaniques initiales des bétons, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées -225-mars-avril 2000, PP51-65.
- [78] **SEDRA NT, de LARRAR DF,** (1994), RENé-LCPC, Un logiciel pour optimiser la granularité des Matériaux de génie civil, Note technique, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 194- Novembre-Décembre.
- [79] **De LARRAR DF, H UC, SITZKA R.J.C.,JOL YM, CLAU XF, SEDRA NT .(1994),** Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics,527,Octobre, pp.17-47.
- [80] **Véronique BAROGHEL-BOUNY, Sylvie ARNAUD, Dominique HENRY, Myriam CARCASSES, Daniel QUENARD :** Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle III – Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire, BULLETIN DES LABORATOIRES DESPONTS ETCHAUSSÉES- 241- NOVEMBRE-DÉCEMBRE2002 - RÉF. 4479 - PP.13-5
- [81] **Véronique BAROGHEL-BOUNY, Josette GAWSEWITCH, Patrick BELIN, Karim OUNOUGH, Sylvie ARNAUD, Gérard OLIVIER, Benoît BISSONNETTE ;** Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle IV. Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure, BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES- 249 MARS-AVRIL2004 - RÉF. 4507 - PP. 49-10
- [82] **F. Stoppa¹*, F. Scordari², E. Mesto², V.V. Sharygin³, G. Bortolozzi⁴,** Calcium-aluminum-silicate-hydrate “cement” phases and rare Ca-zeolite association at Colle Fabbri, Central Italy, Cent. Eur. J. Geosci. • 2(2) • 2010 • 175-187.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[83] NIKITA V. CHUKANOV, SERGEY N. BRITVIN, KONSTANTIN V. VAN, STEFFEN MÖCKEL, ALEKSANDR E. ZADOV, Kottenheimite, $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{SO}_4)2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, a new member of the Ettringite group from the Eifel Area, GERMANY, Article in The Canadian Mineralogist · June 2012. pp. 55-63.

[84] Véronique BAROGHEL-BOUNY, Abdelkrim AMMOUCHE, Hugues HORNAIN, Josette GAWSEWITCH, Vieillissement des bétons en milieu nature: une expérimentation pour le XXI^e siècle II- caractérisation microstructurale sur éprouvettes de béton de résistance 25 à 120 MPA, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 228, septembre-octobre 2000, pp.71.

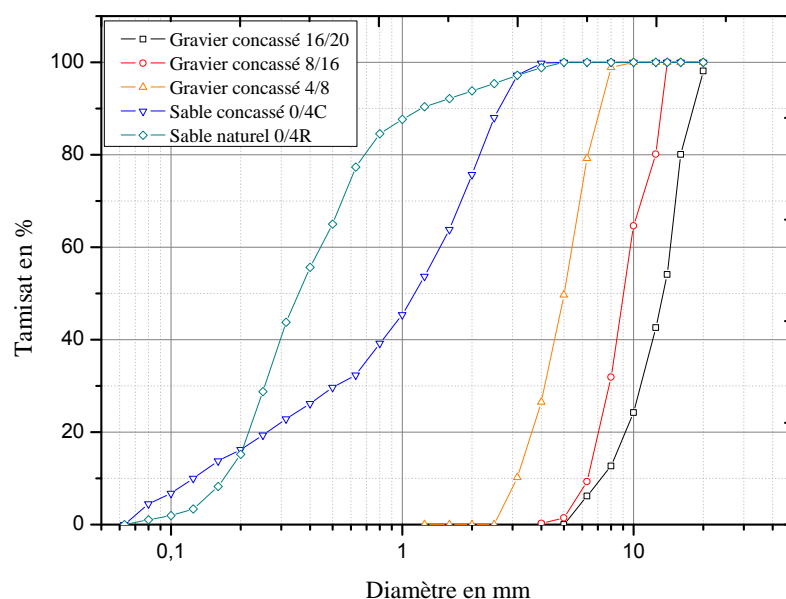


Figure A. 1 : Analyse granulométrique des différentes classes de granulats.

Tableau A.1 : Analyse granulométrique sable calcaire 0 /4C

Diamètre mm	Refus partiel en gramme R_i	Refus cumulé en gramme R_n	$(R^n/M).100$	Tamisats $100-(R_n/M).100$
4.00	0,006	0,006	0,20	99,80
3.15	0,076	0,082	2,76	97,24
2.50	0,274	0,356	11,97	88,03
2.00	0,366	0,722	24,29	75,71
1.60	0,354	1,076	36,19	63,81
1.25	0,3	1,376	46,28	53,72
1.00	0,248	1,624	54,62	45,38
0.80	0,182	1,806	60,75	39,25
0.63	0,206	2,012	67,68	32,32
0.50	0,078	2,09	70,30	29,70
0.40	0,104	2,194	73,80	26,20
0.315	0,1	2,294	77,16	22,84
0.25	0,104	2,398	80,66	19,34
0.20	0,092	2,49	83,75	16,25
0.16	0,074	2,564	86,24	13,76
0.125	0,112	2,676	90,01	9,99
0,1	0,097	2,773	93,27	6,73
0.08	0,066	2,839	95,49	4,51
0,063	0,134	2,973	100,00	0,00

Tableau A.2 : Analyse granulométriques granulométrique sable naturel 0/4R.

Diamètre mm	Refus partiel en gramme R_i	Refus cumulé en gramme R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats $100-(R_n/M).100$
4.00	0,038	0,038	1,18	98,82
3.15	0,052	0,09	2,79	97,21
2.50	0,058	0,148	4,59	95,41
2.00	0,052	0,2	6,20	93,80
1.60	0,054	0,254	7,87	92,13
1.25	0,056	0,31	9,61	90,39
1.00	0,088	0,398	12,34	87,66
0.80	0,1	0,498	15,44	84,56
0.63	0,234	0,732	22,69	77,31
0.50	0,398	1,13	35,03	64,97
0.40	0,3	1,43	44,33	55,67
0.315	0,384	1,814	56,23	43,77
0.25	0,484	2,298	71,23	28,77
0.20	0,438	2,736	84,81	15,19
0.16	0,224	2,96	91,75	8,25
0.125	0,158	3,118	96,65	3,35
0,1	0,044	3,162	98,02	1,98
0.08	0,03	3,192	98,95	1,05
0,063	0,034	3,226	100,00	0,00

Tableau A.2 : Analyse granulométriques granulométrique gravier 4/8.

Diamètre mm	Refus partiel en gramme R_i	Refus cumulé en gramme R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats $100-(R_n/M).100$
10	0	0	0	100
8	0,032	0,032	1,11	98,89
6.3	0,568	0,6	20,79	79,21
5	0,852	1,452	50,31	49,69
4.00	0,67	2,122	73,53	26,47
3.15	0,47	2,592	89,81	10,19
2.50	0,294	2,886	100,00	0,00
2.00	0	2,886	100,00	0,00

Tableau A.3 : Analyse granulométriques granulométrique gravier 8/16.

Diamètre mm	Refus partiel en gramme R_i	Refus cumulé en gramme R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats $100-(R_n/M).100$
16	0	0	0	100
14	0,814	0,814	19,85	80,15
12.5	0,636	1,45	35,37	64,63
10	1,342	2,792	68,10	31,90
8	0,928	3,72	90,73	9,27
6.3	0,32	4,04	98,54	1,46
5	0,048	4,088	99,71	0,29
4	0,012	4,1	100,00	0,00

Tableau A.4 : Analyse granulométriques granulométrique gravier 16/20.

Diamètre mm	Refus partiel en gramme R_i	Refus cumulé en gramme R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats $100-(R_n/M).100$
20	0,079	0,079	1,91	98,09
16	0,744	0,823	19,92	80,08
14	1,073	1,896	45,89	54,11
12.5	0,475	2,371	57,38	42,62
10	0,76	3,131	75,77	24,23
8	0,478	3,609	87,34	12,66
6.3	0,268	3,877	93,83	6,17
5	0,255	4,132	100,00	0,00

Caractéristiques spécifiées par la norme européennes en 12620:2002

Tableau A.5 : Caractéristiques spécifiées par la norme européennes EN 12620:2002

	Valeurs obtenues par essai					Norme européenne en 12620:2002
	Sable 0/4C	Sable 0/4R	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Gravier 16/20	
Passant à 2D	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Passant à 1.4D	100%	100%	100%	100%	100%	95% à 100%
Passant à D	99.8%	98.82%	98.7%	100%	97.81%	85% à 99%
Module de finesse M_f	2.65	2.22	-	-	-	-

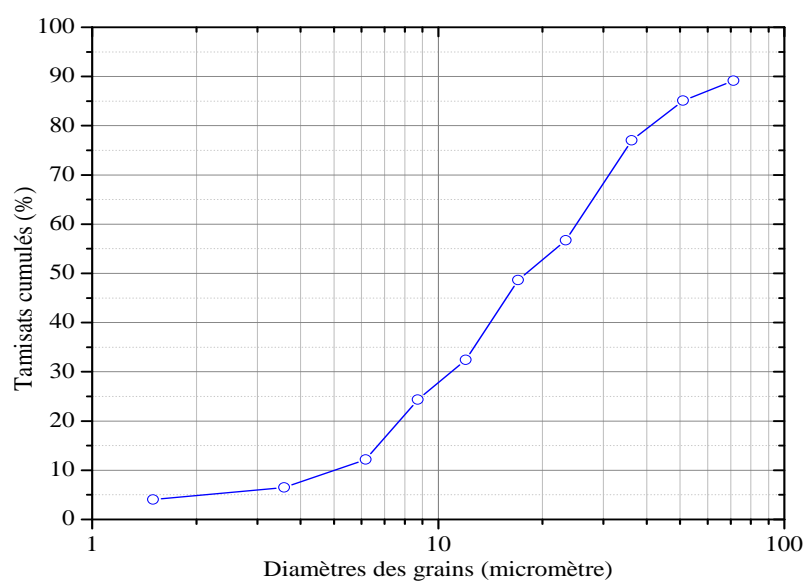


Figure A.2 : Analyse granulométrique par sédimentation