

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI, TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL
LABORATOIRE GEOMATERIAUX ENVIRONNEMENT ET AMENAGEMENT (LGEA)



THÈSE DE DOCTORAT en SCIENCES

Effet du Ciment sans ajouts (CPA) sur les Propriétés Caractéristiques des Mortiers et Bétons à Hautes Performances à base de Poudre de Verre (Etude Expérimentale)

Présentée par :

M^{me} ARAB Bahia Eps AISSAT

Devant le jury d'examen composé de :

Mr. KACHI Mohand Said	Professeur	UMMTO	Président
Mr. MEHADDENE Rachid	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr. KADRI Mohammed	Professeur	U/ Boumerdes	Examineur
Mr. HAMADOUCHE Mohand Ameziane	Professeur	U/ Boumerdes	Examineur
Mr. GHOULEM Kamel	M.C.A	UMMTO	Examineur
Mr KENNOUCHE Salim	M.C.A	U/ Bouira	Examineur

Soutenue le 27 /06/2024

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la volonté pour finir ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse le Professeur Rachid MEHADDENE pour sa disponibilité, ses conseils et ses directives pertinentes tout au long de cette étude.

J'adresse mes chaleureux remerciements aux membres de Jury, qui malgré leur calendrier bien chargé m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer cette thèse.

Je remercie particulièrement la "Société GICA de Sour El Ghozlane (Bouira)" à sa tête son Directeur général qui m'a accueilli et permet d'être des leurs durant la période de mon stage, encourageant la recherche algérienne m'a fourni mon premier matériaux de base le ciment sans ajouts CPA non disponible sur le marché, n'épargnant aucun effort un arrêt de 10 min de sa production pour extraire ce ciment spécial. Aux ingénieurs de laboratoire qualité et production, aux ouvriers et agents, un grand témoignage de reconnaissance de ma part pour votre indéfectible support, vous êtes un exemple à suivre.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tout le personnel du département de Génie Civil de l'Université de Bouira, collègues et amis de m'avoir encouragé et orienter durant ce travail, m'ont ouvert les portes pour faciliter l'exécution de l'ensemble des étapes de ma thèse, aux ingénieurs du laboratoire Matériaux de la Faculté des sciences et sciences appliquées de n'avoir ménagé aucun effort pour me prodiguer d'aide et pour leur collaboration et conseils tout au long de la phase expérimentale de cette étude.

Je remercie également le Laboratoire de Chimie de l'UMMTO pour son assistance dans les essais de caractérisation au MEB, ainsi que l'Unité de recherche de l'Université de Boumerdes pour les essais réalisés au sein de leur laboratoire.

Je souhaite exprimer, de tout mon cœur, toute mon affection et ma reconnaissance à ma chère mère, mes frères et sœurs, aux deux familles ARAB et AISSAT, mes chers amis et collègues de près ou de loin pour leur soutien constant durant cette étude.

A celui qui a su m'épauler, m'encourager et surtout être patient avec moi, ma douce moitié mon cher mari Abdelaziz; à qui je témoigne tendrement toute ma gratitude.

Enfin,

Aux deux lumières de ma vie et ma fierté, mes petits poussins d'amours Mustapha et Dania que j'ai eu le bonheur d'avoir durant la période de réalisation de cette thèse, dieu merci, Maman vous la dédie espérant qu'un jour vous seriez fiers de moi.

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des travaux de recherche

Introduction Générale1

Chapitre 1 : Le Béton à Haute Performance BHP

Introduction.....	6
1. Définition.....	6
1. 1. La Différence entre un béton à haute performance et un béton ordinaire.....	8
1. 2. Avantage des BHP.....	9
2. Les constituants d'un BHP.....	10
2. 1. Le ciment.....	10
2. 2. Les granulats.....	13
2. 3. L'eau.....	14
2. 4. Les ajouts cimentaires ou les additions minérales.....	16
2. 5. Les adjuvants.....	22
3. Principes de formulation des BHP.....	24
4. Caractérisation des BHP.....	25
4. 1. Caractéristiques physiques.....	25
4. 2. Caractéristiques mécaniques.....	27
5. Le développement des BHP en Algérie.....	29
Synthèse d'état de l'art des BHP.....	30

Chapitre 2 : La valorisation du verre dans les BHP

Introduction.....	31
1. Le verre dans les bétons.....	31
1. 1. Ouvrabilité.....	32
1. 2. Influence de la finesse.....	32
1. 3. Prise et hydratation.....	32
1. 4. Performances et durabilité.....	33
1. 5. Retrait de séchage et retrait endogène.....	33
1. 6. Résistance au gel dégel.....	34
1. 7. Résistance à l'écaillage.....	34
1. 8. Pénétrabilité des ions chlorure.....	34
1. 9. Diffusion d'humidité.....	34
2. La Poudre de verre comparée à d'autres ajouts.....	35
3. Utilisation simultanée de la PV avec les ajouts cimentaires classiques.....	37
4. Avantages des bétons à base de poudre de verre.....	38

5. Réaction alcali-silice et Réaction pouzzolanique du verre.....	41
5. 1. La réaction alcali-silice.....	39
5. 2. La réaction pouzzolanique.....	41
6. L'Algérie et l'utilisation de la poudre de verre.....	43
Synthèse d'état de l'art des BPV.....	45

Chapitre 3 : La durabilité chimique des bétons contenant des ajouts

Introduction.....	47
1. Facteurs influençant la Durabilité	48
2. Les attaques chimiques des bétons	48
2. 1. Actions des acides.....	49
2. 2. Actions des sulfates.....	52
2. 3 Actions de l'eau de mer sur le béton.....	56
3. la poudre de verre vis-à-vis des attaques chimiques.....	58
Synthèse d'état de l'art de la durabilité chimique.....	59

Chapitre 4 : Caractérisation des matériaux

Introduction.....	60
1. Identification des matériaux.....	60
1. 1. Ciment.....	60
1. 2. Les granulats.....	61
1. 3. Adjuvant (Superplastifiant).....	62
1. 4. Eau de gâchage.....	62
2. La Poudre de verre (PV).....	62
2. 1. Structure et composition.....	62
2. 2. La poudre de verre dans les bétons	64
2. 3. Propriétés à l'état frais	64
2. 4. Propriétés à l'état durci	65
2. 5. La poudre de verre utilisée dans ce travail de recherche.....	67
Conclusion.....	69

Chapitre 5 : Procédures et techniques expérimentales

1. Essais sur pates	72
1. 1. Essais de consistance.....	72
1. 2. Essais de prise	72
1. 3. Essai d'étalement.....	73
2. Essais sur mortiers	73
2. 1 Formulation des mortiers.....	73
2. 2. Essais mécaniques.....	75
3. Essais sur le béton	76
3. 1. Mode opératoire et confection des éprouvettes du béton.....	76
3. 2. Caractérisation a l'état frais des BHP.....	76
4. Les essais mécaniques	78
4. 1. Essais de compression.....	78
4. 2. Essai de flexion.....	79

4. 3. Essai non destructif par Ultrason.....	79
5. Analyse microstructurale par MEB.....	81
6. Essais de durabilité	83
6. 1. Attaques acides (Hcl).....	83
6. 2. Attaques sulfatiques externes (MgSO ₄).....	85
6. 3. Attaques par l'eau de mer.....	85
6. 4. Mode opératoire.....	86
Conclusion.....	88

Chapitre 6 : Méthode de formulation des BHP

Introduction.....	89
1. Caractéristiques des BHP.....	90
1. 1. Consistance des bétons frais.....	90
1. 2. Propriétés mécaniques.....	90
1. 3. Durabilité.....	90
1. 4. Aspects esthétiques.....	90
2. L'optimisation de la formulation d'un BHP.....	91
3. Spécifications sur les constituants.....	91
4. Performances des BHP.....	92
4. 1. Des propriétés exceptionnelles à l'état frais.....	92
4. 2. Des performances élevées aux jeunes âges.....	92
4. 3. Des résistances mécaniques importantes à long terme.....	92
5. Formulation de notre béton a haute performance.....	93
6. La composition massique des BHP étudiés.....	94

Chapitre 7 : Résultats d'essais sur pates et mortiers

1. Caractérisation à l'état frais	97
1.1 Consistance normale et temps de prise.....	97
1.2 Essai d'étalement et détermination du point de saturation en superplastifiant.....	98
2. Caractérisation a l'état durci	100
2. 1 Activité pouzolanique.....	100
2. 2 Résistance à la compression.....	102
2. 3 Résistance à la flexion.....	108
2. 4. Etude de la microstructure interne avec MEB.....	110
Conclusion.....	114

Chapitre 8 : Résultats d'essais sur BHP

1. Caractérisation a l'état frais (Affaissement et masse volumique).....	115
2. Caractérisation a l'état durci.....	116
2. 1. Evolution des résistances mécaniques en compression.....	116
2. 2. Evolution des résistances mécaniques en traction par flexion	121
2. 3. Evolution de la vitesse à ultrason.....	123
2. 4 Etude de la Microstructure des bétons BHP et ordinaires	127
2. 5 Etude visuel lors d'essais mécaniques sur BHP.....	133
Conclusion.....	135

Chapitre 9 : Résultats de la durabilité

Introduction.....	136
1. Résultats des attaques sur mortier.....	137
1.1. Examen visuel.....	137
1.2. La variation de masse.....	139
1.3. La profondeur de dégradation.....	141
1.4. Les performances mécaniques.....	141
2. Résultats des attaques sur béton.....	146
2.1. La variation de masse.....	146
2.2. La variation de la résistance à la compression.....	147
Conclusion.....	149
Conclusion Générale et Perspectives	150
Références Bibliographiques	157
Annexes	

Liste des figures

Figure 1. Le béton à hautes performances est fréquemment employé dans la construction de ponts (droite) ou de bâtiments multi étagés (gauche)[4].....	7
Figure 2. La microstructure d'un béton ordinaire (a) et d'un BHP (b) [12].....	9
Figure 3. Réactions d'hydratation des composés du ciment portland [15].....	11
Figure 4. Représentation simplifiée de l'hydratation des grains de ciment [16].....	11
Figure 5. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un béton ordinaire de Diamond, 1986 cité par [19].....	13
Figure 6. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat selon Stark et Wicht cité par [20].....	14
Figure 7. Etat de l'eau dans les C-S-H (Sierra, 1974) cité par [20].....	15
Figure 8. Description idéalisée de l'eau dans les zones d'adsorption empêchée et de la transition avec les pores capillaires [20].....	16
Figure 9. Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire (a) et avec ajout cimentaire(b).....	16
Figure 10. Schéma récapitulatif des différents types d'ajouts [18].....	18
Figure 11. Ajouts cimentaires. De gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classe F), laitier et schiste calciné [9].....	19
Figure 12. Image de la Poudre de verre.....	20
Figure 13. Résistance des bétons avec les différents ajouts [9].....	22
Figure 14. Adjuvants liquides de gauche à droite : agent anti-lessivage, réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air [9].....	23
Figure 15. Mode d'action d'une molécule de superplastifiant [32].....	23
Figure 16. Influence d'un accélérateur et un retardateur sur l'évolution des résistances [32]..	24
Figure 17. Evolution de la résistance à la compression de béton en fonction du temps et du rapport E/C [34].....	24
Figure 18. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C [18].....	25
Figure 19. Etat des fissures dans un béton ordinaire (a) et BHP (b).....	27
Figure 20. Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression [38].....	27
Figure 21. Diagramme contraintes-déformation [31].....	28
Figure 22 : Influence du diamètre des particules de verre sur l'expansion et le développement de la résistance en compression [27].....	32
Figure 23. Pénétrabilité des ions chlorure des bétons ayant E/L = 0,55 et 0,40 contenant de la poudre de verre à 28 et 91 jours de murissement [47].....	35

Figure 44. Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite) (b) structure vitreuse, réseau amorphe (Zachariasen 1932 cité par [96]).....	63
Figure 45. Les éléments fondants et stabilisants	63
Figure 46. La résistance en compression pour les bétons ternaires [83].....	65
Figure 47. Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [97].....	66
Figure 48. Pénétrabilité des ions chlorure à 28 jours des bétons incorporant la plupart 20% d'ajouts Cimentaires [48].....	67
Figure 49. a Transformation des déchets de verre en poudre de verre.....	68
Figure 49. b Distribution granulométrique de la poudre de verre.	68
Figure 50. Image MEB de la poudre de verre.....	69
Figure 51. Organigramme détaillant les étapes de l'étude élaborée.....	71
Figure 52. a et b : Appareil de Vicat automatique.....	72
Figure 52. c Essai d'étalement.....	73
Figure 53. La composition massique des mortiers étudiés.....	73
Figure 54. Confection d'éprouvettes de mortier, appareil à choc et chambre de conservation.....	74
Figure 55. Essai mécanique par flexion sur mortiers.....	75
Figure 56. Résistance mécanique à la compression sur mortiers.....	75
Figure 57. Les éprouvettes confectionnées et bac de conservation.....	76
Figure 58. Recommandation de la norme NF EN 12350-2 pour Affaissement au cône d'Abrams - piquage : 25 coups par couche en 3 couches.....	77
Figure 59. Essai d'affaissement au cône d'Abrams réalisé au laboratoire.....	77
Figure 60. Essai de compression avec logiciel de commande.....	78
Figure 61. Essai de flexion 3 point sur prisme de béton.....	79
Figure 62. Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique.....	81
Figure 63. Les types de propagation d'ondes (a: directe, b:semi-directe, c: indirecte).....	81
Figure 64. Un œil de mouche grossi 100, 1000 et 10 000 fois à l'aide d'un MEB.....	82
Figure 65. Observation au MEB de la surface externe des échantillons conservés dans l'eau du robinet. a) Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre. [15].....	83
Figure 66. Acide Hcl sous forme liquide et le MgSO ₄ sous forme solide.....	84
Figure 67. Acide Hcl sous forme liquide et le MgSO ₄ sous forme solide.....	84
Figure 68. La réaction chimique lors d'immersion des éprouvettes de béton et mortier dans la solution acide Hcl.....	85

Figure 69. Le PH mètre utilisé et le contrôle du ph des deux solutions.....	86
Figure 70. La prise de la masse d'échantillons avant et après immersion.....	87
Figure 71. Principe de la profondeur de dégradation.....	88
Figure 72. Les différents environnements de conservation étudiés pour les mortiers.....	88
Figure 73. Optimisation de dosage pondéral des granulats par la méthode de DREUX-GORISS.....	93
Figure 74. Les Différents bétons BHP confectionnés.....	96
Figure 75. Consistance des pates en fonction des pourcentages de substitution de la PV.....	97
Figure 76. Les temps de prise en fonction des pourcentages de substitution de la PV.....	98
Figure 77. Mesure du diamètre d'étalement.....	99
Figure 78. Mesure du diamètre d'étalement.....	99
Figure 79. Etalement des pates en fonction du % de la poudre de verre.....	100
Figure 80. a Indice d'activité pouzzolanique pour P=25% de poudre de verre (de masse du ciment).....	102
Figure 80. b. Indice d'activité pouzzolanique pour les trois pourcentages de PV à différents âges.....	102
Figure 81. Evolution de la cinétique du durcissement en fonction du % de PV.....	103
Figure 82. Influence du dosage en PV sur la résistance à la compression (MPa) à différent âges.....	103
Figure 83. L'effet d'étuvage.....	104
Figure 84. Evolution dans le temps de la résistance en compression sous l'effet de l'étuvage.....	104
Figure 85. Effet de la PV sur la résistance en compression à différent âges sous l'effet de l'étuvage.....	105
Figure 86. Effet de la variation des rapports E/L et E/C sur la résistance à la compression (MPa) en fonction du % de la PV à différent âges.....	106
Figure 87. Effet du ciment CPJ et CPA sur la résistance à la compression à différent âges en fonction du pourcentage de la PV.....	107
Figure 88 a. Influence du dosage en PV sur la résistance à la flexion (MPa) à différent âges.....	109
Figure 88 b. Effet des rapports E/L et E/C sur la résistance en flexion (MPa) en fonction du dosage en PV.....	109
Figure 89. Image MEB des mortiers pour E/L= 0.35 à l'âge de 7 jours.....	111
Figure 90. Image MEB des mortiers pour E/L= 0.35 à l'âge de 90 jours.....	112
Figure 91. Image MEB du mortier avec 20% de poudre de verre à l'âge de 28 jours.....	113

Figure 92. Evolution de l'affaissement.....	116
Figure 93. Evolution du durcissement en fonction du % de poudre de verre des BHP.....	117
Figure 94. Influence du dosage en poudre de verre sur la résistance à la compression (MPa) des BHP à différent âges.....	118
Figure 95. Influence du dosage en poudre de verre sur le gain en résistance à la compression (MPa) des BHP à différent âges.....	119
Figure 96. Influence du dosage en poudre de verre sur la résistance à la compression (MPa) des Bétons ordinaires BO à différent âges.....	120
Figure 97. Evolution de la résistance à la flexion dans le temps en fonction du % de poudre de verre des BHP.....	122
Figure 98. Influence du dosage en poudre de verre sur la résistance à la flexion des BHP à différent âges.....	123
Figure 99. Vitesse ultrasonique des BHP en fonction du dosage en poudre de verre.....	125
Figure 100. Effet du rapport eau /liant et le taux de la PV sur la Vitesse ultrasonique.....	126
Figure 101. Corrélation entre vitesse ultrasonique et la masse volumique des BHP.....	127
Figure 102. Corrélation entre vitesse ultrasonique et résistance à la compression des BHP....	127
Figure 103. Image MEB pour un béton avec 0% et 20% de poudre de verre a l'âge de 7, 28 et 90 jours.....	131
Figure 104. Image MEB pour un béton avec 0% et 20% de poudre de verre a l'âge de 7, 28 et 90 jours.....	132
Figure 105. Image photographique réelle de la structure interne après essai de flexion 3 points.....	133
Figure 106. Image photographique réelle de l'ouverture de fissures après essai de flexion 3 point	134
Figure 107. Image photographique réelle de la propagation de fissure lors d'un essai de compression.....	134
Figure 108. Aspect général des échantillons après 180 jours de réservations dans les deux solutions.....	138
Figure 109. Les changements visuels remarqués à 180 jours.....	138
Figure 110. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution acide.....	139
Figure 111. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution sulfatique.....	139
Figure 112. Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau de mer.....	139
Figure 113. La profondeur de dégradation à l'âge de 180 jours.....	141
Figure 114. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans la solution Hcl.....	142

Figure 115. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans la solution Mg SO ₄	143
Figure 116. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans l'Eau de mer.....	144
Figure 117. Comparaison des résistances a la compression à 180 jours de conservation dans les différents milieux.....	145
Figure 118. Variation de la masse des bétons immergés dans les différents milieux.....	146
Figure 119. Comparaison des résistances à la compression à 180 jours de conservation dans les différents milieux.....	157

Liste des tableaux

Tableau 1. Formulation de bétons à hautes performances typiques utilisés en structure [9].....	8
Tableau 2. Comparaison entre un béton ordinaire et BHP.....	8
Tableau 3. Résistances des bétons à haute performance [11].....	9
Tableau 4. Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland [9].....	10
Tableau 5. Les différents types de ciments courants [18].....	12
Tableau 6. Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes [24].....	17
Tableau 7. Compositions chimiques du CPA.....	60
Tableau 8. Composition minéralogique du CPA.....	61
Tableau 9. Caractéristiques physiques du ciment CPA.....	61
Tableau 10. Caractéristiques mécaniques des ciments.....	61
Tableau 11. Caractéristiques physiques des granulats.....	61
Tableau 12. Caractéristiques techniques d'adjuvant (données fournisseur).....	62
Tableau 13. Composition typique des verres creux [62, 3, 27].....	64
Tableau 14. Compositions chimiques de la poudre de verre.....	73
Tableau 15. La composition massique des mortiers (en gramme).....	75
Tableau 16. Quelques exemples de formulation pour 1 m ³ BHP [12].....	92
Tableau 17. Les Bétons BHP confectionnés avec les paramètres à varier	95
Tableau 18. La composition massique des différents BHP étudiés.....	95
Tableau 19. Temps de début et fin de prise des différentes pâtes.....	98
Tableau 20. Propriétés à l'état frais des Bétons a haute performance et bétons ordinaires.....	115
Tableau 21. Résultats des mesures de la masse volumique, résistance à la compression et de la vitesse à l'ultrason VU.....	124

Liste des travaux

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a été proposé et dirigé par le Professeur MEHADDENE Rachid, au Laboratoire Géo-matériaux Environnement et Aménagement (LGEA) du département de Génie civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Le travail a fait l'objet de plusieurs publications et communications :

❖ Publications

1. **Bahia Arab, Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab.** Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances Déchets Sciences et Techniques - N°75 - Décembre 2017. <https://doi.org/10.4267/déchets-sciences-techniques.3665>
2. **Bahia Aissat-Arab and Rachid Mehaddene.** Strength of glass powder based high performance concrete during the time. Algerian Journal of Engineering and Technology 08 (2023) 108–116. <https://doi.org/10.57056/ajet.v8i1.99>
3. **B. Aissat-Arab , R. Mehaddene , Y. Boucheneb.** Effect of special cement CPA on the characteristic properties of cementitious materials based waste glass powder: pozzolanic activity and heat treatment. Journal of Applied Engineering Sciences. vol. 13(26), issue 2/2023 No. 369, pp. 147-154. <https://doi.org/10.2478/jaes-2023-0019>
4. **B. Aissat-Arab, R. Mehaddene.** Effect of cement dosing without additions (CPA) on high-performance and ordinary concrete based glass powder as fine partial cement replacement: A Comparative study. Advances in Materials Science. Vol. 24, No. 1 (79), March 2024.

❖ Rencontres nationales

1. **ARAB Bahia** et al « Etude de l'effet de la poudre de verre sur les mortiers à base de CPJ et CPA» 6^{ème} SNMPE, Boumerdes 2016.
2. **ARAB Bahia** et al « Effet de la réaction pozzolanique de la silice (SiO₂) sur la durabilité des mortiers à base de poudre de verre ».1^{er} Séminaire National sur la Chimie des Matériaux. Boumerdes, 24 et 25 Avril 2017.
3. **ARAB Bahia** et al « Valorisation des déchets de verre recyclés e poudre dans les mortiers ordinaires et à hautes performances à base de ciment Algerien CPA (Etude comparative) » 3^{ème} CIMDD, Boumerdes 7 et 8 Novembre, 2017.
4. **AISSAT-ARAB Bahia** et al «effet de l'étuvage a jeune âge sur la résistance mécanique de la poudre de verre comme substituant cimentaire». Journée Scientifique et Technique de l'Hydraulique et de Génie Civil (JST-HGC), Bouira, 02-11-2023.

Résumé

L'amélioration des propriétés physico-mécanique du béton reste toujours l'un des soucis majeurs des chercheurs, pour cela la technologie du béton incorporant les débris de verre broyés s'inscrit dans une approche du développement durable. En effet, cette technologie permet de porter un changement de l'environnement par la récupération des bouteilles de verre jetées dans la nature en Algérie (en bord de mer, le long des routes et dans les espaces verts) sachant qu'une bouteille en verre met au moins 4.000 ans pour se dégrader. Ce verre très riche en silice réactive vue sa composition chimique, broyé finement sera utilisé comme substituant pour la confection des produits cimentaires, ce qui semble être une bonne alternative pour son recyclage.

Valoriser l'ajout de la poudre de verre (PV) comme remplacement partiel du ciment sans ajouts CPA dans la composition du mortier et béton à hautes performances (MHP et BHP) est l'objectif essentiel assigné à ce travail à travers la caractérisation expérimentale du comportement dans le temps des éléments fabriqués, à partir de ce type de béton avec une substitution dans des proportions différentes de la poudre de verre variant de 10 à 30 % par rapport à la masse du ciment. À cet effet, une étude comparative a été menée sur un mortier et béton à haute performance de référence sans poudre de verre, tout en variant le rapport Eau- Liant (E/L) et le rapport Eau-Ciment (E/C), fixés à 0.35 et à 0.5. A savoir que notre Liant est composé de Ciment et PV ($L = C + PV$). Ce choix de ce type de ciment (95% clinker + 5% gypse) est très judicieux dans le but d'éliminer toute sorte d'interaction entre la PV et les autres ajouts cimentaires rajoutés lors de la fabrication des ciments commerciaux.

Outre que l'intérêt économique, notre étude a montré que les mortiers et bétons avec PV présentaient des performances très intéressantes à long terme validées conjointement avec les résultats des vitesses d'ondes ultrasonores et la microstructure interne des échantillons examinés. Les résultats des essais de l'attaque acide (HCl), l'attaque sulfatique ($MgSO_4$) et l'eau de mer ont montré également que la PV à une influence sensiblement positive sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des produits cimentaires dans les quels elle est incorporée.

Mots clés : Ciment sans ajout CPA, Poudre de verre (PV), Substitution, Mortier (MHP), Béton à Haute performance (BHP), Résistance mécanique, Vitesse à Ultrason (VU), Microstructure (MEB), Durabilité, Attaques chimiques.

Abstract

The improvement of the physico-mechanical properties of concrete remains one of the major concerns of the researchers, for this the concrete technology incorporating the crushed glass debris is part of an approach of sustainable development. Indeed, this technology makes it possible to bring about a change in the environment by recovering glass bottles thrown into nature in Algeria (by the sea, along roads and in green spaces) knowing that a glass bottle takes at least 4,000 years to degrade. This glass very rich in reactive silica due to its chemical composition, finely ground will be used as a substitute for the manufacture of cement products, which seems to be a good alternative for its recycling.

Valorize the addition of glass powder (GP) as a partial replacement of cement without additions CPA in the composition of high performance mortar and concrete (HPM and HPC) is the essential object assigned to this work through the experimental characterization of the behavior over time of the manufactured elements, from this type of concrete with substitution in different proportions of glass powder varying from 10 to 30 % in relation to the mass of cement. To this end, a comparative study was conducted on high performance reference mortar and concrete without glass powder and the by varying the ratio Water-Binder (W/B) and the ratio Water-Cement (W/C), fixed at 0.35 and 0.5. Knowing that our Binder is composed of Cement and GP ($B = C + GP$). This choice of cement CPA (95% clinker + 5% gypsum) is very judicious in order to eliminate any kind of interaction between GP and cement additions added during the manufacture of commercial cements.

Besides the economic interest, our study showed that mortars and concretes with GP are very interesting long-term performances validated jointly with the results of ultrasonic wave velocities and the internal microstructure of the samples examined.

The results of acid attack (HCl), sulphate attack ($MgSO_4$) and seawater showed that GP has a significantly positive influence on the physico-mechanical properties and durability of the cement products in which it is incorporated.

Keywords: Cement without addition CPA, Glass powder (BP), Substitution, Mortar (HPM), High performance concrete (HPC), Mechanical strength, Ultrasonic speed (VU), Microstructure (MEB), Durability, Chemical attacks.

Introduction Générale

Du béton plus performant et... plus vert !

Recycler nos propres déchets pour fabriquer un matériau cimentaire plus vert et d'une résistance exceptionnelle est certainement à l'avantage des producteurs de béton... et de la planète.

1. contexte :

Ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de bétons à hautes performances et ultra-hautes performances, plus ductiles, plus durables et plus résistants. Ces innovations n'auraient pu voir le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle microscopique des mécanismes de comportement du béton. Ces importantes avancées lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque là destiné. Deux voies de recherche sont à l'origine du développement spectaculaire des BHP :

- L'apparition d'une nouvelle génération de superplastifiant hautement réducteur d'eau, à double action dispersion et défloculation. Cela est obtenu grâce à l'utilisation de polymères modernes (polysulfonate et polycarboxylates), qui offrent la possibilité d'une réduction sensible du dosage en eau ce qui permet de formuler des bétons avec un rapport eau/ciment inférieur à 0,3.
- L'amélioration de l'étendu granulaire par l'ajout d'additions minérales sous forme de fillers qui a un double rôle : l'augmentation de la compacité par remplissage d'une partie de volume des vides et micro vides, d'une part, et d'autre part, et grâce à leur réactivité chimique, participe à la formation d'hydrate secondaire et par conséquent améliore la résistance et la durabilité [1].

L'utilisation des ajouts minéraux comme substituant cimentaire connaît un essor de plus en plus considérable à la fois en raison des considérations économiques mais encore plus en raison de la prise de conscience des aspects environnementaux et de la philosophie de développement durable qui s'introduit dans les activités de Génie Civil. Le verre mis en décharge accentue les problèmes environnementaux par la pollution et le gaspillage d'espace pouvant servir à des fins plus utiles.

En Algérie, les estimations faites par le ministère de l'environnement font état de la possibilité de récupération de 50.000 tonnes/an, mais en absence du circuit de collecte et de recyclage des bouteilles en verre, celles-ci sont directement jetées dans les bennes à ordures ou en décharges sauvages (en bord de mer, le long des routes et dans les espaces verts).

Après l'eau, le béton est le matériau le plus utilisé sur la planète ! Améliorer la performance du béton tout en réduisant l'empreinte écologique liée à sa production devient alors un enjeu important. Relevé ce défi, l'équipe du professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke (Canada)

a développé une innovation majeure pour l'utilisation de silice dans la fabrication du béton de haute performance. Sa solution : remplacer essentiellement la fumée de silice, un matériau peu accessible, par des nano poudres de verre provenant de déchets recyclés disponibles localement et abondamment. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable, l'Algérie doit obligatoirement utiliser les technologies innovantes dans le domaine d'élaboration des matériaux et bétons de construction. Parmi les bétons innovants on trouve les BHP (bétons à hautes performances), dont l'utilisation à une double finalité : améliorer la résistance mécanique des éléments et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux de construction. Malgré que ces nouveaux bétons sont largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies. Leurs utilisations en Algérie, reste très limitée. Actuellement les BHP sont formulés à base de la fumée de silice ou d'un mélange de la fumée de silice avec un ajout pouzzolanique. Bien que certaines pouzzolanes naturelles soient toujours utilisées dans certains pays, il ne semble pas qu'elles étaient utilisées à grande échelle pour fabriquer des bétons à hautes performances (BHP). La plupart de ces pouzzolanes proviennent des coproduits industriels. Parmi ces pouzzolanes les plus utilisées, on trouve la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les cendres volantes et Le laitier de haut fourneau broyé qui est un ajout minéral et qui possède plusieurs qualités pouzzolanique (composition chimique voisine de celle du ciment Portland et réactivité hydraulique latente activée en présence de ciment Portland) [2].

Puisque le verre est un matériau unique inerte pouvant être recyclé infiniment sans pour autant changer ces caractéristiques physico-chimiques, les études menées par [3] au sein du laboratoire de matériaux cimentaires alternatifs de l'Université de Sherbrooke ont permis de démontrer la pouzzolanité de la poudre de verre et son utilisation comme ajout cimentaire. De plus, de par sa composition chimique qui est majoritairement de la silice (>70 % massique), la poudre de verre répond aux exigences requises par la norme ASTM C618 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) et peut être classée comme une pouzzolane de classe N. Sa structure amorphe fait également de la poudre de verre un excellent ajout cimentaire, la poudre de verre peut donc être incorporée au béton avec des effets bénéfiques et assez comparables à ceux des ajouts classiques.

2. Avantages :

Béton plus performant, moins perméable et plus durable, Substitution de matière polluante: le CO_2 dégagé par les cimenteries par du verre recyclé.

Coûts de transformation et de transport réduits pour les ajouts cimentaire tel la fumée de silice donc une empreinte écologique réduite et une nouvelle filière pour le recyclage du verre. [4]

Le procédé novateur repose sur la transformation du verre recyclé en fine poudre. En plus d'être un matériau alternatif plus écologique, les dimensions nanométriques de cette poudre améliorent les propriétés du béton. En effet, les microsphères contenues dans la poudre de verre densifient le béton, le rendant encore plus résistant et moins perméable. [5]

3. Problématique

En Algérie, les déchets de verre constituent un problème environnemental grave à cause de la défiguration des paysages. L'une des voies plausibles de valorisation de verre est son utilisation comme remplacement partiel du ciment.

Les études examinées ont montré que les déchets de verre peuvent être utilisés dans le ciment et le béton, cependant la taille des particules de déchets de verre joue un rôle essentiel dans la réaction destructive RAS : la réaction alkali-silice et la performance du béton. Les propriétés pouzzolaniques du verre augmentent avec la diminution de sa granulométrie de moins de 100 μm .

Pour enrichir et approfondir les recherches entamées sur la poudre de verre, notre étude consistait à la mise en place d'une poudre de verre utilisable dans la fabrication de mortier et béton à haute performance ayant des performances acceptables. C'est pour cette raison que nous avons jugé utile d'apporter notre modeste contribution afin de pouvoir valoriser la poudre de verre et encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau noble dans la construction.

Il s'agit donc de préparer un mortier de revêtement MHP et un béton à haute performance BHP de qualité remarquable avec des matériaux locaux Algériens, deux questions auxquelles des réponses s'imposent sont :

« Serait-il possible d'obtenir un MHP et un BHP avec de bonnes performances mécaniques à partir de la substitution d'une quantité de ciment sans ajouts CPA par une quantité de poudre de verre extraite des déchets de verre recyclés en fines particules? »

« Quelle serait la durabilité des éléments élaborés à long terme, serait-il résistant vis-à-vis des attaques sulfatiques, acides et à l'eau de mer ? »

Pour répondre à ces deux questions un large protocole expérimental a été adopté. Il sera donc question de mettre en évidence l'effet de l'incorporation de 10 à 30 % de poudre de verre substituée au ciment sur le développement des résistances mécaniques et la durabilité physique et chimique des MHP et BHP (la résistance aux les attaques des sulfate MgSO_4 , acide HCl et eau de mer). Les résultats obtenus sont comparés à ceux relatifs au mortier et béton témoin sans poudre de verre. Ainsi par cette contribution il nous sera possible de répondre à plusieurs objectifs :

- **Ecologiques** : Il s'agit de procéder à la diminution des quantités des déchets de verre (Bouteilles) en les utilisant, après traitement comme additions minérales dans les matériaux de construction. Ce qui aura un impact écologique important en contribuant à la préservation de l'environnement par la diminution de l'utilisation du ciment dégageant des gaz à effet de serre.
- **Economiques** : Comme toutes les additions minérales (pouzzolane, fillers calcaire, laitier,...), la poudre de verre un matériau intéressant et bon marché, peut constituer un liant pour la

confection des bétons et de ce fait assurer une économie dans la consommation du ciment dont le prix ne cesse d'augmenter.

→ **Technologique** : L'élaboration des mortiers et bétons à base de poudre de verre ayant des performances mécaniques et physico – chimiques égales et éventuellement meilleures que celles des BHP incorporant d'autres additions assurera un véritable succès technologique dans le domaine des matériaux de construction.

4. La mission :

La thèse porte sur l'étude des mortiers et bétons à hautes performances à base de ciment sans ajouts (CPA) et de poudre de verre, ces objectifs sont multiples :

Les trois premiers chapitres étaient consacrés à l'étude bibliographique dans laquelle il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail, elle servira par la suite de base pour les analyses et les discussions des résultats expérimentaux. Dans le premier, nous présenterons une synthèse générale regroupant l'ensemble des connaissances sur le BHP, les méthodes de caractérisation ainsi que les différentes propriétés de ces types de béton. Dans le deuxième chapitre nous avons évoqué la valorisation des déchets de verre dans les produits cimentaires et son effet comparé aux autres différents déchets minéraux. Le troisième est consacré à l'étude de la durabilité chimique des bétons, tout en abordant les facteurs affectant la durabilité des BHP.

Dans le quatrième chapitre, sont décrits les matériaux utilisés dans la composition de nos mortiers et bétons et principalement notre substituant la poudre de verre, par contre au niveau du cinquième c'est les méthodes d'essais permettant de mesurer des grandeurs physico-mécaniques passant de l'état frais à l'état durci des MHP et BHP, ainsi que les paramètres de durabilité (résistance aux attaques acides HCl, attaques sulfates de magnésium MgSO₄ et enfin l'attaque par eau de mer. Les facteurs à varier, à savoir le pourcentage de poudre de verre (10, 20 et 30% par rapport à la masse du ciment), le rapport E/L et E/C fixé d'abord à 0.35 ensuite à 0.5 pour fin de comparaison. Par la suite viendra le chapitre six dans le quel est détaillé la méthode de formulation du BHP avec poudre de verre.

Les trois derniers chapitres regrouperont les résultats et les analyses relatifs à la campagne expérimentale menée sur les formulations des MHP et BHP. Le septième est consacré aux propriétés des MHP à l'état frais et durci. Dans le huitième sont présentés les résultats relatifs aux propriétés mécaniques à l'état frais et durci également des BHP, passant par l'analyse des vitesses à ultrason VU ainsi que la microstructure MEB. Enfin dans le neuvième chapitre, les résultats des essais de durabilité chimique des mortiers bétons étudiés sont analysés.

Le manuscrit s'achève par une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus sur la faisabilité de MHP et BHP en substituant le ciment CPA par la poudre de verre, éventuellement des perspectives seront proposées pour des futurs travaux de recherche pour mieux améliorer ce travail.

"Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements."

Charles Darwin / 1809-1882

-
- **Des déchets de verre comme une matière de construction:**
Récupération des bouteilles pour préserver l'environnement.
 - **Du matériau aux propriétés recherchées dans l'acte de construire.**
 - **Le verre vis-à-vis des autres matériaux.**
 - **Le verre et l'eau:** amis, ennemis et parfois complices dans le béton.
 - **Durabilité des verres et préservation :** une méthodologie de conception indispensable.
 - **Singularités, variabilité, classement :** vers un matériau de construction comme les autres, mais finalement différent...
-

Chapitre 1

Le Béton à Haute Performance BHP

Introduction

Inventé par les Romains, oublié pendant près de 1 500 ans, le béton est redécouvert pour connaître un essor considérable qui en fait de lui aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde, comme deuxième produit le plus consommé après l'eau, chaque habitant de la planète consomme annuellement 1,5 m³ de béton !

De nos jours, l'évolution dans la science et la technologie du béton font que ce dernier est un système plus complexe que le traditionnel mélange eau-ciment-granulats, le béton incorpore dans sa matrice non seulement des ajouts cimentaires mais aussi des adjuvants chimiques qui améliorent ses propriétés à l'état frais et durcis. Le béton moderne est devenu un produit nécessitant une recherche interdisciplinaire (physique, chimie et génie) pour améliorer sa qualité et son développement durable.

Depuis plusieurs années, nombreux sont les efforts visant à réduire son empreinte environnementale du béton, parmi ces travaux, l'avancement des technologies en regard des ajouts cimentaires suscite beaucoup d'intérêt. Plusieurs ajouts sont connus depuis quelques décennies, comme la fumée de silice, les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres volantes. Tandis que d'autres font leur apparition sur le marché tel que les balles de riz ou la poudre de marbre ou de verre. La poudre de verre permet de réduire l'empreinte écologique des bétons; non seulement en réduisant la quantité de ciment nécessaire, mais aussi en consommant le verre recyclé qui se dirige très souvent vers les sites d'enfouissement. Dans ce projet, le verre recyclé est utilisé comme remplacement cimentaire partiel.

Le béton, composé essentiellement de constituants minéraux, offre des qualités intrinsèques : durabilité, comportement mécanique et résistance aux agressions chimiques, tenue au feu, qualités acoustiques, diversité des formes, des couleurs et des aspects, qui sont les garants d'ouvrages pérennes, efficaces, écologiques, économes et harmonieux.

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis. Elles ont débouché sur la mise au point d'une gamme de bétons aux nouvelles performances. Les résistances, la durabilité, l'ouvrabilité et les qualités esthétiques ont enregistré des avancées considérables.

1. Définition

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance, cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années 80. Elle est passée de 30 à 35 MPa, à plus de 100 MPa pour les Bétons à Très Hautes Performances, voire plus de 200 MPa pour les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP).

Les BHP se caractérisent par:

- une résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre,
- un rapport E/Liant inférieur à 0,4.

Les bétons à hautes performances possèdent des caractéristiques physiques (résistance, durabilité, rhéologie, etc.) supérieures à celles des bétons ordinaires. Ces bétons, conçus pour satisfaire des critères de performance particuliers, peuvent être fabriqués avec des matériaux usuels et avec des matériaux spéciaux. Les bétons à hautes performances peuvent nécessiter des techniques spéciales de production, de

manutention et de mise en place. Les bétons à haute performance ont surtout été utilisés pour la construction de tunnels, de ponts et d'édifices en hauteur en raison de leurs propriétés mécaniques, leur durabilité et leur module d'élasticité élevé [6]. Ils ont aussi été utilisés dans les réparations en béton projeté [7], dans les poteaux, dans les stationnements multi étagés et pour des applications agricoles [8]. Les caractéristiques des bétons à haute performance peuvent être modulées pour des applications et des environnements spécifiques. Les BHP sont généralement utilisés lorsqu'une ou plusieurs des propriétés suivantes sont requises : [9]

- Haute résistance et Haute résistance initiale
- Haut module d'élasticité
- Haute résistance à l'abrasion
- Haute durabilité et meilleure durée de vie dans un environnement sévère
- Faible perméabilité et faible coefficient de diffusion
- Haute résistance aux agressions chimiques
- Haute durabilité aux cycles de gel-dégel et aux sels de déglacage
- Ténacité et résistance à l'impact
- Stabilité volumétrique
- Facilité de mise en place
- Consolidation sans ségrégation
- Prévention du développement de bactéries et moisissures

Les BHP sont fabriqués avec des constituants choisis avec soin, dont la composition est optimisée et qui sont malaxés, mis en place, consolidés et mûris selon les plus hautes normes de l'industrie. Typiquement, ces bétons possèdent un rapport eau/liants entre 0,20 et 0,45. Des superplastifiants sont généralement utilisés pour produire des bétons fluides et maniabiles. Les BHP ont presque toujours une résistance à la compression plus élevée que les bétons de composition conventionnelle.



Figure 1. Le béton à hautes performances est fréquemment employé dans la construction de ponts (droite) ou de bâtiments multi étagés (gauche) [4]

Cependant, la résistance en compression n'est pas toujours la principale propriété recherchée. Par exemple, un béton de résistance normale possédant une très haute durabilité et une très faible perméabilité est considéré comme ayant des caractéristiques de haute performance. Bickley et Fung [10] ont démontré qu'un béton à haute performance de 40 MPa utilisé pour la construction de ponts peut être produit économiquement tout en satisfaisant les exigences concernant le facteur de durabilité et la résistance à la pénétration des ions chlore.

Les spécifications des bétons à hautes performances devraient être idéalement formulées en fonction de critères de performance. Malheureusement, de nombreuses spécifications sont formulées en intégrant des

critères de performance (comme la perméabilité ou la plage de résistance) et des exigences de formulation (comme la plage de teneur en air ou le dosage des ajouts cimentaires)

Le tableau 1 présente quelques formulations typiques

Tableau 1. Formulation de bétons à hautes performances typiques utilisés en structure [9]

Identification du mélange	1	2	3	4	5	6
Eau (kg/m ³)	151	145	135	145	130	130
Ciment (kg/m ³)	311	398*	500	335*	513	315
Cendres volantes (kg/m ³)	31	45	—	—	—	40
Laitier (kg/m ³)	47	—	—	125	—	—
Fumée de silice (kg/m ³)	16	32*	30	40*	43	23
Gros granulat (kg/m ³)	1068	1030	1100	1130	1080	1140
Sable (kg/m ³)	676	705	700	695	685	710
Réducteur d'eau (L/m ³)	1,6	1,7	—	1,0	—	1,5
Retardateur (L/m ³)	—	—	1,8	—	—	—
Teneur en air (%)	7 ± 1,5	5 – 8	—	—	—	5,5
Réducteur d'eau de haute efficacité ou superplastifiant (L/m ³)	2,1	3	14	6,5	15,7	5,0
Rapport eau/liants	0,37	0,30	0,27	0,29	0,25	0,34
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	59	—	93	99	119	—
Résistance en compression à 91 jours (MPa)	—	60	107	104	145	N/A

1. 1. La Différence entre un béton à haute performance et un béton ordinaire

➤ En termes de composition

Deux principes à respecter, la réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants ; l'optimisation de la répartition granulométrique des composants en ajoutant des fines.

Tableau 2. Comparaison entre un béton ordinaire et BHP [9]

Matériaux	Béton ordinaire	Béton BHP
E/L	0,50	0,24
Ciment	335	475
Fumée de silice	--	52
Liant	335	527 (≠ 192 kg)
Eau	170	108 (≠ 62 L)
Sable	950	740
G. granulat	1135	1080
WRA - Superplastifiant	780 ml/m ³	27 L
Affaissement (mm)	110	160
% air	2,0	2,5
f'c28d (MPa)	37,5	112
f'c91d (MPa)	44,4	127
ft'28d (MPa)	3,5	12,9
ft'91d (MPa)	4,0	13,4
E'c à 56 d (GPa)	31	49

➤ En termes de résistance

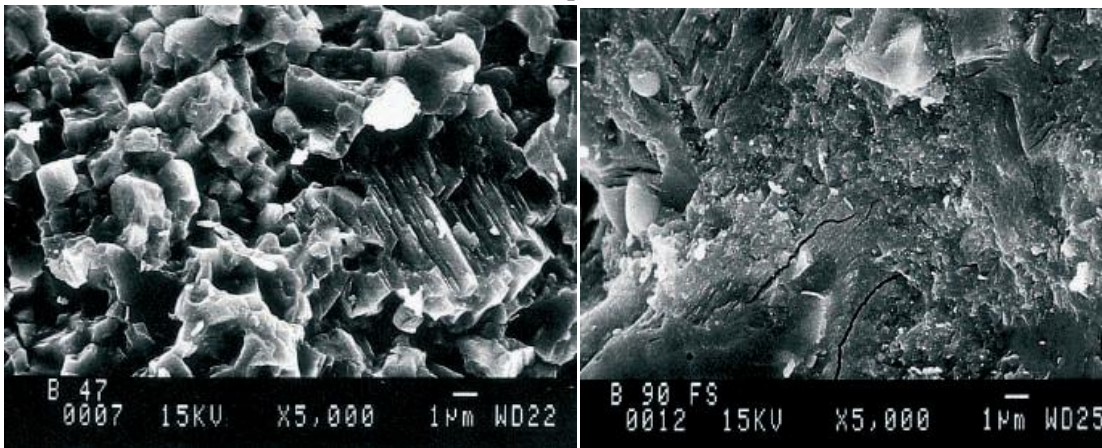
Le tableau I.3 indique les résistances en MPa des bétons à haute performance comparées à celles des bétons courants.

Tableau 3. Résistances des bétons à haute performance [11]

Caractéristiques du béton	Formule classique (en MPA)	BHP (en MPA)
Résistance à 1 jour	5	25
Résistance à 7 jours	15	50
Résistance à 28 jours	30	60
Fluage	2	1,5
Rapport E/C	0,5	0,35
Résistance en traction	2,5	4

➤ **En termes de microstructure**

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haut compacté.



(a) Béton courant

(b) BHP

Figure 2. La microstructure d'un béton ordinaire (a) et d'un BHP (b) [12]

1. 2. Avantage des BHP

Le BHP présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel:

→ **Des propriétés exceptionnelles à l'état frais**

La formulation (à l'aide de superplastifiants) des BHP leur confère une grande fluidité, une ouvrabilité accrue (valeur d'affaissement au cône supérieure à 150 mm pendant plusieurs heures [11]), une aptitude au pompage améliorée, un maintien de la plasticité dans le temps, et une bonne stabilité à l'état frais, ce qui :

- garantit un bon remplissage des moules et des coffrages et un enrobage parfait des armatures ;
- facilite la mise en œuvre, en particulier dans les zones très ferraiées ;
- améliore le rendement de mise en place du béton (il en résulte une réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et un gain sur le coût de la main d'œuvre) ;
- permet des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.
- une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
- une faible viscosité, qui autorise le pompage sur de longues distances.

→ **Des performances élevées aux jeunes âges**

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges ce qui autorise :

- des décintrements et des décoffrages rapides et une accélération et optimisation des cycles de coffrage/décoffrage ;
- des délais avant mise en tension des armatures de précontraints raccourcis ;
- une accélération et une optimisation des cadences de fabrication.

Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

→ **Des résistances mécaniques importantes à long terme**

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme.

Ces performances, qui découlent en particulier de sa faible porosité peu connectée, se traduisent par :

- une meilleure adhérence acier/béton ;
- un fluage inférieur à celui des bétons ordinaires ;
- une augmentation du module d'élasticité ;
- une résistance importante aux agents agressifs ;
- un faible risque de corrosion des armatures ;
- une forte résistance aux cycles de gel/dégel ;
- une faible perméabilité.

La durabilité est améliorée du fait de la très faible porosité, une amélioration de la résistance aux agressions chimiques, qui se traduit par un comportement favorable en milieu marin [13] ou en présence d'eaux agressives. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures. Les BHP présentent généralement une résistance au cycle de gel/dégel améliorée. L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées.

2. Les constituants d'un BHP

2. 1. Le ciment

Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium dans un rapport d'environ 95-5 %. Le clinker est fabriqué par cuisson vers 1450 °C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire et d'argile (ou de marnes) dans un rapport d'environ 80-20 % pour former des silicates de calcium ainsi que des aluminates et aluminoferrites de calcium.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante [14], qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. Le ciment joue dans la construction les rôles suivants:

- Assurent la cohésion des éléments de maçonnerie en les reliant entre eux.
- Assurer la prise, le durcissement.
- Dans le béton participe au bouchage des vides, c'est-à-dire à l'accroissement de la compacité.
- L'étanchéité à l'eau en augmentant les dosages.

La composition minéralogique moyenne du clinker de ciment Portland est donnée dans le tableau 4

Tableau 4. Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, [9]

Constituant	Notation cimentaire	Formule brute	% massique des différentes phases dans le clinker
Silicate tricalcique (alite)	C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅	60-65
Silicate bicalcique (bélite)	C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	10-20
Aluminate tricalcique	C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	8-12
Aluminoferrite tétracalcique	C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ O ₁₀ Fe ₂	8-10

❖ L'hydratation du ciment

« Hydratation » est un mot utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions qui interviennent dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau. Comme toutes les réactions chimiques, celles-ci obéissent à des lois thermodynamiques.

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe qui a été étudié pour la première fois par Henri Le Chatelier (1887). Schématiquement, Le Chatelier a décrit trois étapes relatives à la prise du ciment :

1. L'adsorption physique et chimique de l'eau par les grains de ciment,
2. La dissolution ou solvatation, des grains de ciment ou phases anhydres, en présence d'eau,
3. La précipitation des phases hydratées.

$2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ Silicates tricalcique	$+6\text{H}_2\text{O}$ eau	$=3\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Silicates de calcium hydrates	$+3(\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O})$ Hydroxyde de calcium
$2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ Silicates bicalciques	$+4\text{H}_2\text{O}$ eau	$=3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ Silicates de calcium hydrates	$+\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ Hydroxyde de calcium
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminates tricalcique	$+3(\text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ gypse	$+26\text{H}_2\text{O}$ eau	$=6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ettringite
$2(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ Aluminates tricalcique	$+6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ettringite	$+4\text{H}_2\text{O}$ eau	$=3(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O})$ Monosulfoaluminate de calcium
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminates tricalciques	$+\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ Hydroxyde de calcium	$+12\text{H}_2\text{O}$ eau	$=4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Aluminate tetracalcique hydraté
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Aluminoferrite tetracalcique	$+10\text{H}_2\text{O}$ eau	$+2(\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O})$ Hydroxyde de calcium	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Aluminoferrite de calcium hydraté

Figure 3. Réactions d'hydratation des composés du ciment portland [15]

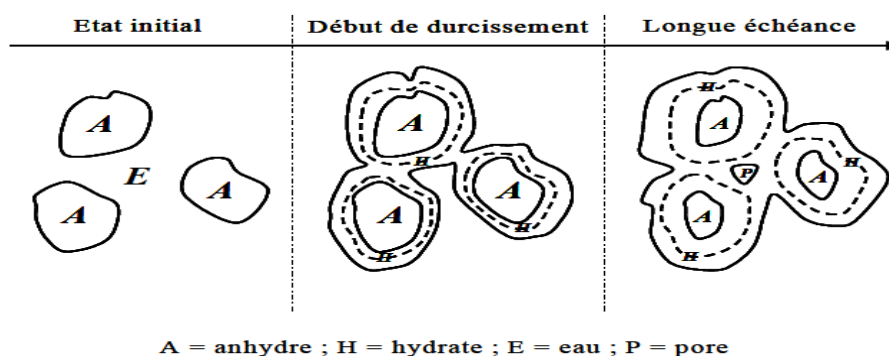


Figure 4. Représentation simplifiée de l'hydratation des grains de ciment [16]

2. 2. Les granulats

Comme les trois quart du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton [19], mais selon leurs propriétés, ils affecteront la durabilité et la performance structurelles du béton. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de Sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton [17].

Les granulats destinés au béton proviennent de trois sources :

- Les carrières de roches massives ; Les gisements alluvionnaires ; Les productions de granulats artificiels légers (laitier expansé, argile expansée, schiste expansé, etc.).

Trois grandes catégories de roches existent dans la nature :

- Les roches éruptives qui proviennent des profondeurs de l'écorce terrestre ;
- Les roches métamorphiques qui sont partiellement ou complètement recristallisées sous l'effet de pression et de température élevées, ces transformations leur donnant souvent une structure orientée ;
- Les roches sédimentaires qui proviennent de la consolidation de sédiments ou de la précipitation de minéraux en solution. Elles ont une origine détritique chimique ou organique.

Un granulat est caractérisé du point de vue granulométrique par sa classe d/D. Selon la norme NF P 18-101

Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,

Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,

Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm.

❖ Intérêt des granulats dans le béton

Intérêt économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition)

Intérêt technique : Amélioration des variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigides que la pâte de ciment)

❖ L'interface pâte de ciment/granulat

La liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et les granulats se traduit par une zone de pâte particulière appelée "auréole de transition" ou interface pâte/granulats. Son épaisseur augmente avec la taille des granulats mais est toujours inférieure à 50 μm . Elle se caractérise par une porosité 30% plus importante que celle de la pâte de ciment et une orientation préférentielle des hydrates. Plusieurs modèles décrivent cette zone de transition. Sur la Figure I.5, le modèle de [Diamond, 1986] cité par [19] pour un béton ordinaire est présenté.

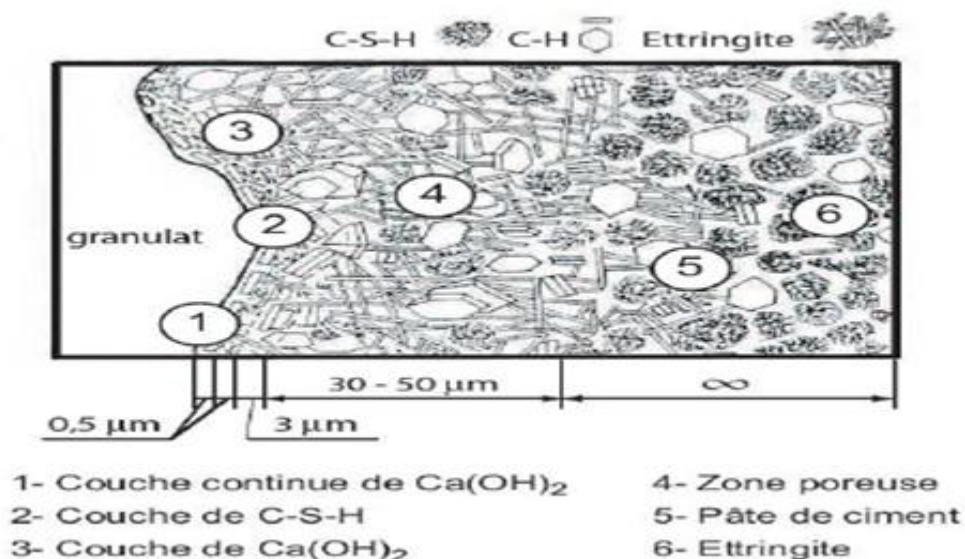


Figure 5. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un béton ordinaire cité par [19]

On observe une zone de pâte hydratée particulière autour des granulats. La première couche la plus proche de la surface des granulats, très compacte, est composée de cristaux de portlandite orientés perpendiculairement aux granulats. La deuxième couche d'épaisseur approximative de 0,5 μm est composée de feuillettes de C-S-H. Après une deuxième couche de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nous passons dans la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécanique par rapport à la matrice. Cette zone représente le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques et les premières fissures contournent les granulats et passent à travers la matrice.

La nature des granulats influence la qualité de la zone de transition. Les granulats calcaires (réactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion.

La réaction entre le CaCO_3 provenant des granulats calcaires et les aluminates tricalciques et les aluminoferrites tétracalciques engendrent une formation de monocarbo - aluminates de calcium ($[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}]_2 \text{CO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$).

En outre, l'ajout de fumée de silice dans de nombreuses formulations de BHP entraîne la consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique pour former des C-S-H, néanmoins différents de ceux formés lors de l'hydratation des C_3S ou C_2S . La Figure 6 illustre ce phénomène avec la présence de cristaux de portlandite dans la zone de transition orientés perpendiculairement aux granulats pour un BHP sans fumée de silice et leurs absences pour le BHP avec fumée de silice. La formation de ces C-S-H génère une réduction de la porosité également accentuée par l'effet de remplissage (effet filler) de cette fine, améliorant ainsi les performances mécaniques du matériau [20].

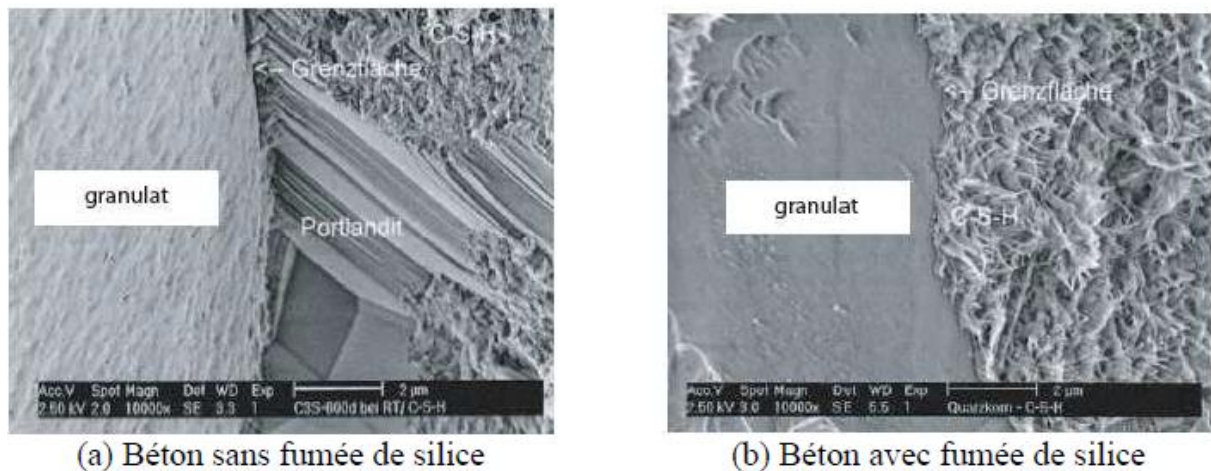


Figure 6. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat selon Stark et Wicht cité par [20]

2. 3. L'eau

Les vides dans la matrice solide du béton sont plus au moins remplis d'eau. Cet état hydrique dépend essentiellement du degré d'hydratation du matériau, de l'humidité relative régnant dans le réseau poreux. L'eau présente est un des constituants à part entière de la microstructure du matériau. En effet l'eau absorbée des microspores du gel, par exemple de part sa structuration et grâce aux forces qui la lient au solide participe avec lui à la cohésion et à la résistance mécanique du matériau. Il en est de même pour l'eau capillaire liée au solide par des forces de tension superficielles dont les mouvements entraînent des déformations de la matrice cimentaire.

L'eau va donc jouée un rôle essentiel dans le comportement des matériaux durci, non seulement sur le plan mécanique (résistance, retrait de dessiccation et fissuration induite dus à l'évaporation de l'eau des

pores, fluage, ect.) mais aussi sur celui de la durabilité, par l'intermédiaire de paramètres tels que la perméabilité aux liquides et aux gaz réagissant les transports d'agents agressifs au sein du matériau.

L'eau introduite au cours de la fabrication est présente sous de multiples états dans, le béton durci, on peut donner la classification simplifiée suivante [21]:

L'eau est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pate de ciment hydratée. Les différentes classes sont dans l'ordre croissant de liaison:

- ❖ **L'eau libre et capillaire** : elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimension supérieure a 10 µm (gros pores et fissures). Cette eau est la première à s'évacuer ou à s'évaporer (entre 30 et 120°C) lors d'un séchage ou d'un chauffage
- ❖ **L'eau adsorbée** : elle est adsorbée sur les surfaces solides.

Physiquement : les forces d'attraction sont de type Van Der Waals. La structure de l'eau adsorbée et de la surface absorbante n'est pas affectée par cette adsorption.

Chimiquement : des électrons sont mis en commun entre l'eau et la surface solide.

- ❖ **L'eau chimiquement combinée** : elle a réagi chimiquement avec le ciment pour former un nouveau produit, comme le C-S-H ou l'ettringite.

L'eau présente dans les C-S-H et l'eau présente dans les zones d'adsorption empêchée jouent un rôle majeur dans le comportement différé du béton. Les caractéristiques de ces eaux jouant un rôle essentiel sont les suivantes :

– Eau dans les C-S-H : A partir de multiples méthodes expérimentales, cité par [20] a pu identifier dans la structure des C-S-H, la présence de l'eau sous trois formes, classées ici par ordre décroissant d'énergie de liaison avec le solide (voir Figure 7):

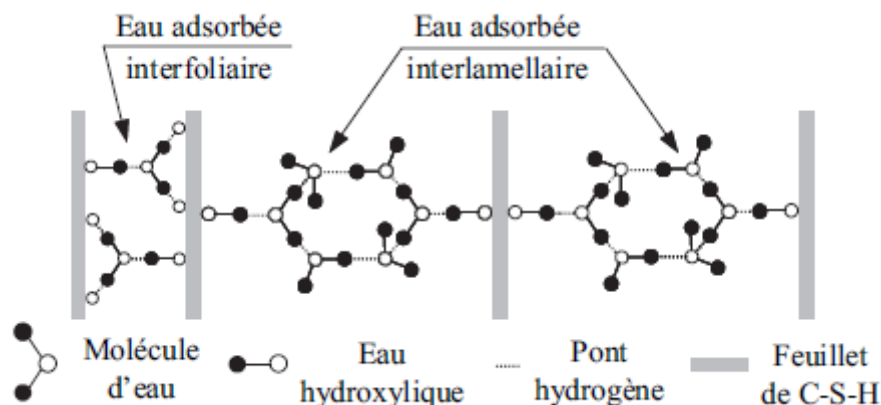


Figure 7. Etat de l'eau dans les C-S-H (Sierra, 1974) cité par [20]

L'eau hydroxyle (groupement OH) : elle est liée aux atomes de silicium et de calcium à la surface des feuillets.

L'eau interfoliaire (ou interfeuille) : elle est liée aux feuillets par des groupements hydroxyles. Elle intervient dans la cohésion intrinsèque de la lamelle.

L'eau interlamellaire : elle est soit fixée à la surface des lamelles par un hydroxyle, soit liée à d'autres molécules d'eau.

- ❖ **Eau dans les zones d'adsorption empêchée** : L'adsorption libre ne peut avoir lieu lorsque les surfaces adsorbantes sont trop proches. On est alors en zone dite d'adsorption empêchée (voir Figure 8). Dans ces zones, l'eau fortement adsorbée, est sous pression, dite de disjonction, de l'ordre de 130 MPa [22]. Cette pression s'oppose aux forces d'attraction, qui existent entre les particules de C-S-H et qui maintiennent la structure du squelette. Cette pression semble être à

l'origine également du retrait de dessiccation et sa relaxation dans le temps semble être responsable de l'aspect vieillissant à long terme du fluage.

Cette eau est ainsi un élément structurel à part entière du matériau, capable de transmettre localement les contraintes.

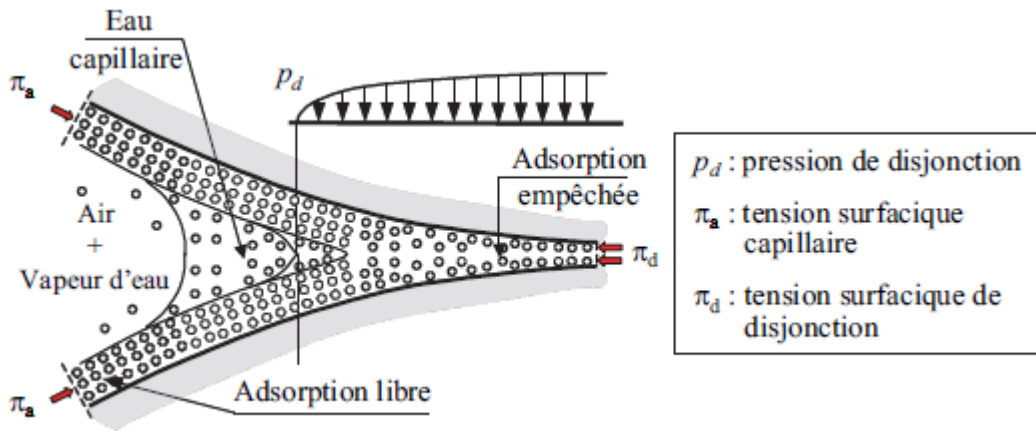


Figure 8. Description idéalisée de l'eau dans les zones d'adsorption empêchée et de la transition avec les pores capillaires [20].

2. 4. Les ajouts cimentaires ou les additions minérales

Il est possible de modifier la microstructure du béton en incorporant des produits minéraux. Ces ajouts modifient la microstructure du béton en termes de caractéristiques physiques et chimiques. Il a été prouvé que l'introduction des minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires (figure 9.a) et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux (figure 9. b).

De plus, les dimensions des pores capillaires sont réduites grâce à la réaction pouzzolanique de l'ajout minéral avec la chaux en présence de l'eau en donnant des C-H-S cité par [23]

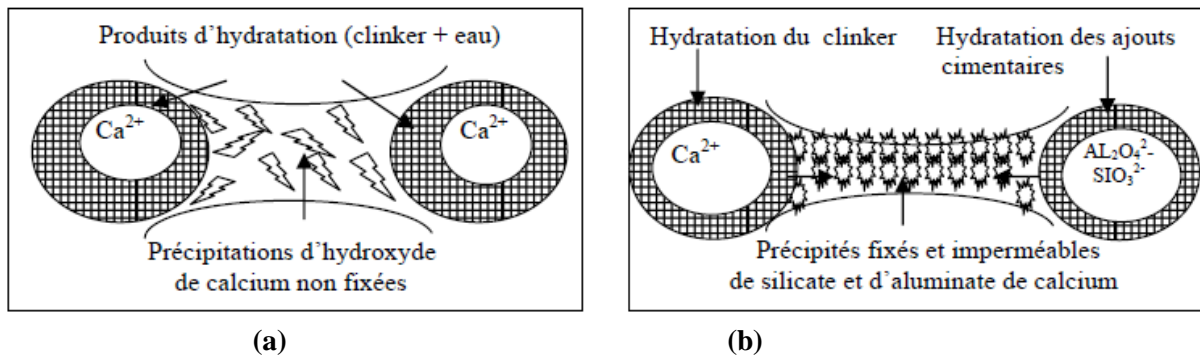


Figure 9. Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire (a) et avec ajout cimentaire (b).

2. 4. 1. Utilisation des additions minérales en Algérie

Bien que l'emploi des additions minérales se soit généralisé dans le monde, il reste très limité en Algérie. Vu la disponibilité en grande quantité de ces ajouts tels que le laitier granulé, le calcaire ou la pouzzolane naturelle et leurs coûts relativement réduits par rapport au ciment, leur emploi dans le domaine du génie civil n'est pas encore répandu. En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons. Actuellement, l'emploi des additions se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire pour la production du ciment composé. Le tableau 1.6 résume l'utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes.

Tableau 6. Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes [24]

Cimenterie	Ajouts utilisés
Ain Touta (Batna)	Pouzzolane
Ain El Kebira (Sétif)	
Hamma Bouziane (Constantine)	
Hadjar Soud (Skikda)	Laitier granulé
Tebessa	
Meftah (Alger)	Tuf/Calcaire
Raïs Hamidou (Alger)	-
Sour EL Ghozlane (Bouira)	Calcaire/Tuf
Chlef	Calcaire
M'sila	Laitier granulé Pouzzolane
Beni Saf (Tlemcen)	Pouzzolane
Zahana (Oran)	
Saida	

2. 4. 2. Les différents types d'additions minérales

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. Les données bibliographiques [25] recommandent l'emploi de quantités importantes de fines dans un béton autoplaçant pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques de ségrégation. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment Portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications demandées. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le dégagement de chaleur engendré par les réactions exothermiques produites lors de l'hydratation du ciment peuvent provoquer des fissurations de l'élément et il est donc naturel de remplacer une partie de ce volume par des additions minérales, qui sont moins réactives que le clinker et d'un coût inférieur sur le plan énergétique et environnemental.

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actifs

❖ **Origine et classification :** Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

→ **a - Les ajouts inertes:**

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker.

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage. Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs.

→ **b- Les ajouts minéraux actifs :** Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs

• **b.1 Ajouts minéraux actifs naturels**

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

• **b.2 Ajouts minéraux actifs artificiels**

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs -Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles) -Les cendres des combustibles.
- Les laitiers métallurgiques. -Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique a quantité élevée.
- Les argiles cuites se pressentent sous forme de poudre fine obtenue à la suite de broyage de l'argile à teneur élevé en Kaolinite ($AL_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$) spécialement cuite à une température de 600 à 800°C.
- Les laitiers métallurgiques sont également utilisés dans la production du ciment autant qu'ajouts minéraux actifs. L'activité des laitiers est déterminée à partir de sa composition minéralogique et du rapport des phases cristallines et vitreuses qui dépendent des conditions de refroidissements.
- L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages pas rapport aux ajouts inertes

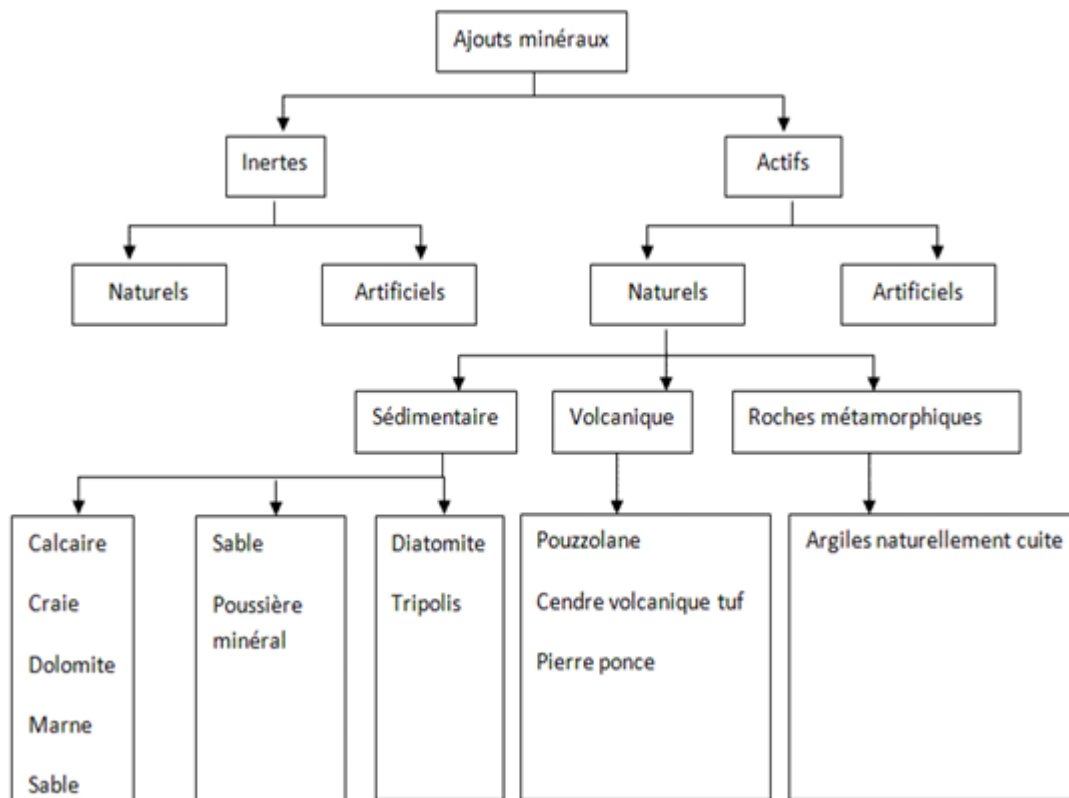


Figure 10. Schéma récapitulatif des différents types d'ajouts selon [18]

➤ **Fillers (calcaire et siliceux) [24]**

Ce sont des poudres de roche (calcaire ou siliceuse) obtenue par broyage et/ou sélection, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18-508 et 509 respectivement pour les fillers calcaires et siliceux. La demande en eau des fines siliceuse telles que le quartz est supérieure à celle des fillers calcaires d'usage plus courant dans les bétons. Ceci est dû à la forme anguleuse des particules de quartz. En plus de leur effet physique, des études sur les fillers calcaires, ont montré qu'ils présentent une certaine activité physico-chimique, qui favorise l'accélération de l'hydratation du clinker par la création de sites de nucléation (germination) hétérogène, notamment, lorsque l'addition est finement broyée. Néanmoins, l'effet n'est remarquable que seulement au jeune âge. D'après les mêmes études, le calcaire

réagit avec les aluminates du ciment pour former des carbo-aluminates de calcium hydratés, qui sont favorables à la durabilité du matériau [26].

D'un point de vue industriel, les fillers calcaires présentent de bonnes caractéristiques de régularité à la production. D'autre part, leur couleur généralement claire les rend favorables à l'obtention de parements architectoniques.



Figure 11. Ajouts cimentaires. De gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classe F), laitier et schiste calciné [9].

➤ **Laitier granulé de hauts fourneaux**

Les minerais de fer sont utilisés pour la fabrication de la fonte ; en plus de leurs phases ferreuses, ces minerais contiennent aussi des minéraux proches de ceux du cru du clinker. Lors du processus de fusion du minerai dans les hauts fourneaux à une température allant de 1135 à 1350°C, se produit la séparation gravitaire, la fonte se dépose dans la partie inférieure du four, tandis que le laitier surnage en partie supérieure dû à sa faible densité par rapport à la fonte. À la sortie du four, le laitier à une température avoisinant celle de la fusion, est refroidi brusquement à l'eau (trempe) et le laitier prend l'appellation de laitier granulé défini par la norme NF EN 15167-1. La vitrification du laitier granulé par la trempe confère au matériau son pouvoir hydraulique latent. Un broyage fin du laitier lui permet d'être utilisé comme addition dans les ciments et les bétons.

Considéré au début comme un déchet de la sidérurgie, ensuite comme coproduit, l'utilisation du laitier granulé reste cependant limitée en Algérie au domaine de la cimenterie en raison de son faible pouvoir hydraulique. Le laitier granulé procure au matériau des performances mécaniques et une durabilité accrue [26], c'est pourquoi les ciments au laitier sont particulièrement indiqués pour les bétons soumis à des ambiances agressives.

➤ **Poudre de verre**

Le verre est une matière fabriquée à partir d'un mélange de sable, de soude et de chaux chauffé à une température élevée pour le faire fondre, le rendre liquide.

La recette de base - sable, soude et chaux - n'a pas changé au fil des siècles, mais il existe bien des variantes. Par exemple, l'ajout de potasse et de plomb améliore la qualité du verre, alors que l'introduction de cobalt, de soufre ou d'autres minéraux le colore. Pour accélérer la fusion, on ajoute au mélange de matières premières du calcin, un déchet de verre. Les ingrédients pour fabriquer une masse de verre sont mélangés et fondus dans de grandes marmites chauffées dans un four.

Contrairement à la plupart des autres substances que nous produisons, il ne se cristallise pas en refroidissant. Il devient plutôt un «liquide ultra-refroidi» se comportant un peu comme le caramel et résistant à tout changement de la disposition de ses molécules. Cela signifie qu'on peut manipuler le verre

quand il est chaud pour lui donner toute forme voulue et qu'il conservera cette forme en refroidissant. Les objets en verre durs et solides qui nous sont familiers sont tous passés d'un état liquide chaud à un état rigide froid sans subir de changement structurel.

Qu'est-ce qui rend cette substance à la fois pratique et belle? Le verre est relativement facile à fabriquer, les matières premières sont abondantes et bon marché, et il peut être recyclé et réutilisé indéfiniment. Il change peu avec le temps et n'est pas affecté par les matières corrosives, même par la plupart des acides. Le verre ne réagit pas avec son contenu, ne retient pas les odeurs et peut être complètement stérilisé. Les liquides et l'air ne peuvent le traverser, mais la lumière y pénètre facilement. De plus, le verre ne conduit pas l'électricité. Il peut par ailleurs être laminé, moulé, soufflé et coulé tandis qu'il est fondu, et on peut lui donner toutes les couleurs imaginables.

Les verres de silicates auxquels se rapportent les verres utilisés dans cette étude sont composés d'oxydes formateurs, fondants, stabilisants et colorants. L'ingrédient de base est la silice (SiO_2) qui représente environ 68 à 74% de la masse et constitue l'élément formateur. Les fondants et les stabilisants sont constitués par (K_2O , Na_2O , CaO , MgO). La couleur du verre est obtenue en additionnant aux crues, certains oxydes métalliques. Ainsi, le Fe_2O_3 donne la couleur brune, le Cr_2O_3 la couleur verte, le CuO la couleur bleue, le MnO_2 la couleur rose, et le AgO la couleur jaune. Leur emploi dans le verre permet de diminuer la température de fusion et d'augmenter la durée de travail du verre lors du façonnage. Les proportions entre ces trois constituants vont dépendre en grande partie des caractéristiques d'un verre. On obtient par fusion entre 1400°C et 1500°C une masse visqueuse, amorphe, homogène et transparente, C'est le verre.

Du fait de sa nature vitreuse et du contenu de certaines quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement [3] et [27]. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Différentes études ont pu montrer que la couleur du verre, autrement dit sa composition chimique, joue un rôle conséquent sur les propriétés mécaniques de ce dernier.

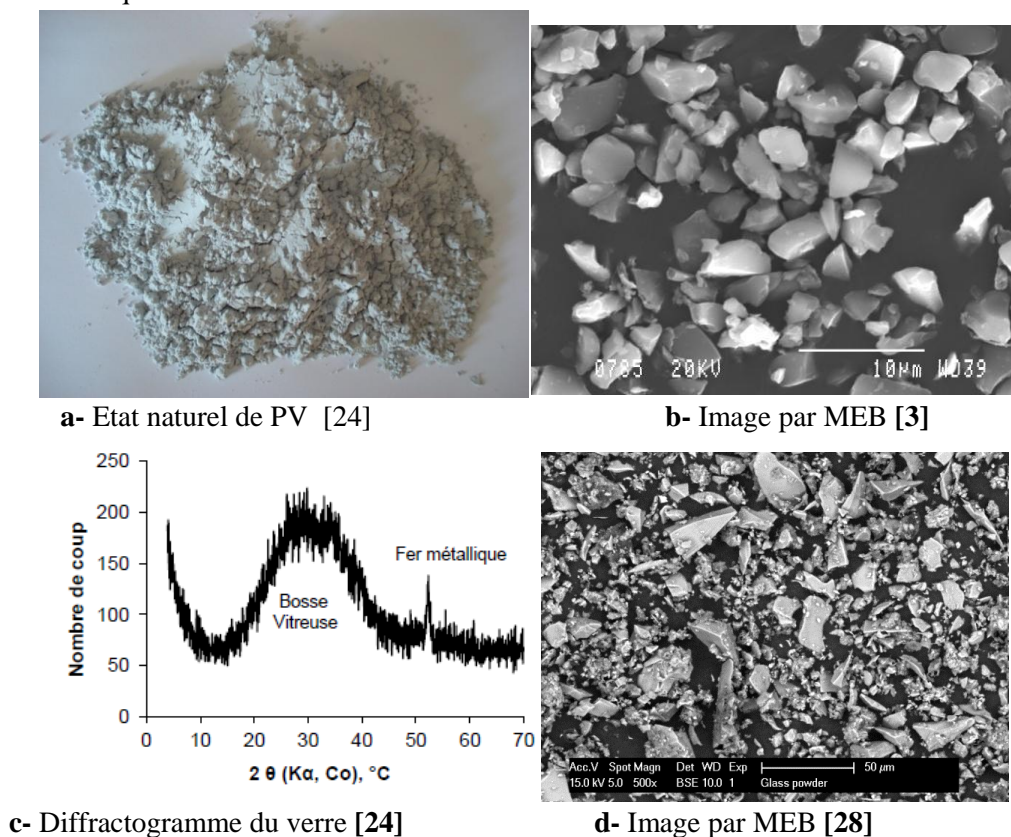


Figure 12. Image de la Poudre de verre

➤ **Fumée de silice**

Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication du silicium métal et de ses alliages, en particulier du ferro-silicium, la fumée de silice obéit à la norme NF EN 13263-1). Elle se caractérise par un diamètre des particules sphériques ultra fines (entre 0,01 et quelques micromètres) et par une teneur en silice amorphe de plus de 90%. L'emploi de la fumée de silice doit se faire conjointement avec un fluidifiant du type superplastifiant afin de remédier à l'agglomération causée par sa finesse [29]. Une bonne dispersion, permet aux particules de la fumée de silice de se placer entre les interstices des grains de ciment, diminuant ainsi la quantité d'eau nécessaire au mélange. L'utilisation de la fumée de silice conduit à des bétons extrêmement compacts à caractéristiques mécaniques élevées et une résistance nettement renforcée vis-à-vis des milieux agressifs.

Cependant, le niveau de performances atteint par l'ajout de fumée de silice et leur prix excessif (entre 5 à 10 fois plus onéreux que le ciment), ainsi que l'utilisation conjointe des superplastifiants, réserve ce produit de luxe à des utilisations bien particulières, telles que les ouvrages d'art, les grattes ciel, les plates-formes pétrolières, etc. [11]

➤ **La pouzzolane**

Les pouzzolanes peuvent être définies comme des matériaux ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau et à former des composés possédant des propriétés liantes. Elles sont formées d'éléments surtout vitreux (peu d'éléments cristallisés comme la zéolite). Mais elles peuvent contenir des constituants nocifs tels que : les substances organiques et les argiles gonflantes [30]

❖ *Les pouzzolanes naturelles*

Produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

- soit d'origine volcanique : verre volcanique, pierre ponce, trasse, tuf, vitrophyres.
- soit d'origine sédimentaire : diatomite, tripolis, gaize.

❖ *Les pouzzolanes artificielles*

Toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer:

- roches traitées thermiquement : argile et schiste expansés.
- cendres volantes, laitier métallurgique.

➤ **Le calcaire**

Dreux G. [18] a défini les fillers comme étant des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte...) naturelles, agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité...). Les fillers sont dits inertes, s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau.

Les normes s'accordent pour définir comme « fines » les éléments passant à travers un tamis de 80µm. On adopte aussi le terme « filler » pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80µm. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution. Les fillers calcaires sont:

- soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques ;
- soit obtenus par broyage du matériau cru.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes :

- origine métamorphique, il s'agit des marbres ; et origine sédimentaire.

2. 4. 3. Effets des additions

On peut résumer l'effet des additions sous forme de fillers sur les propriétés des BHP comme suit [31]:

❖ **a. Effet fillers ou effet de remplissage :**

Modification au niveau du squelette granulaire du mélange par une compensation du déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides.

❖ **b. Effet physique ou de surface :**

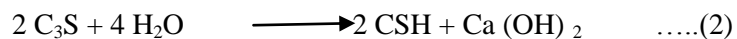
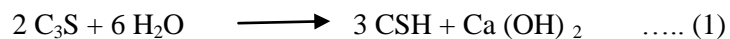
Les hydrates du ciment nouvellement formés pourraient précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrates qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

Ce processus entraîne une apparente accélération d'hydratation. La germination hétérogène reposant sur les phénomènes de surface il est donc logique que la résistance augmente avec l'augmentation de la finesse des additions.

❖ **c. Effet chimique ou pouzzolanique :**

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice, qui est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment [16] pour donner naissance au CSH secondaire. Les étapes de formation des CSH secondaires sont données si dessous :

- formation de la portlandite :



- Réaction pouzzolanique

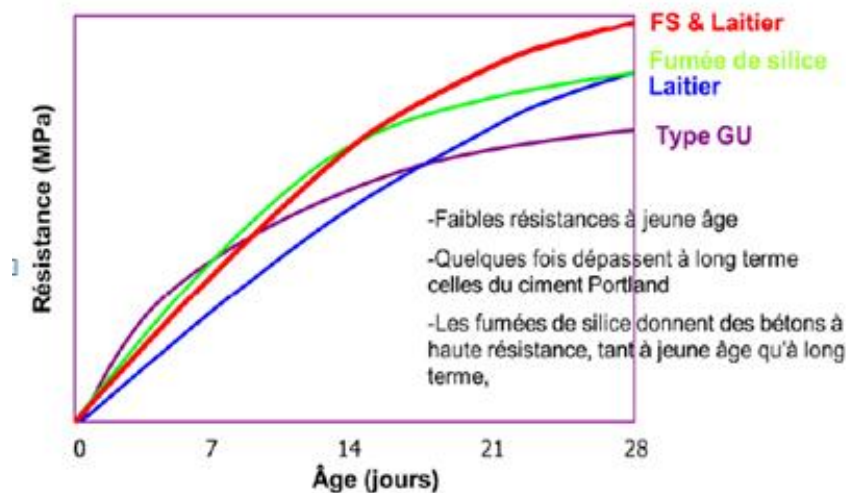
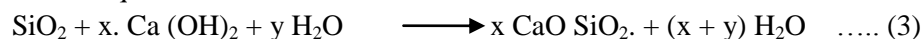


Figure 13. Résistance des bétons avec les différents ajouts [9]

2. 5. Les adjuvants

On appelle adjuvant tout ingrédient, autre que le ciment portland, l'eau et les granulats, que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage (Figure I.14). On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

1. Les entraîneurs d'air
2. Les réducteurs d'eau
3. Les superplastifiants
4. Les accélérateurs
5. Les retardateurs
6. Les contrôleurs d'hydratation
7. Les inhibiteurs de corrosion
8. Les réducteurs de retrait
9. Les inhibiteurs de réaction alcali-silice
10. Les adjuvants pour colorer le béton

11. Les adjuvants divers, tels que ceux qui améliorent la plasticité, l'adhérence, l'imperméabilisation, l'étanchéité, l'injection, la formation de bulles de gaz, le pompage et les adjuvants moussants.



Figure 14. Adjuvants liquides de gauche à droite : agent anti-lessivage, réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air [9].

Leur action est différente d'un adjuvant à un autre en contact des grains de ciment.

D'une manière générale, les adjuvants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment.

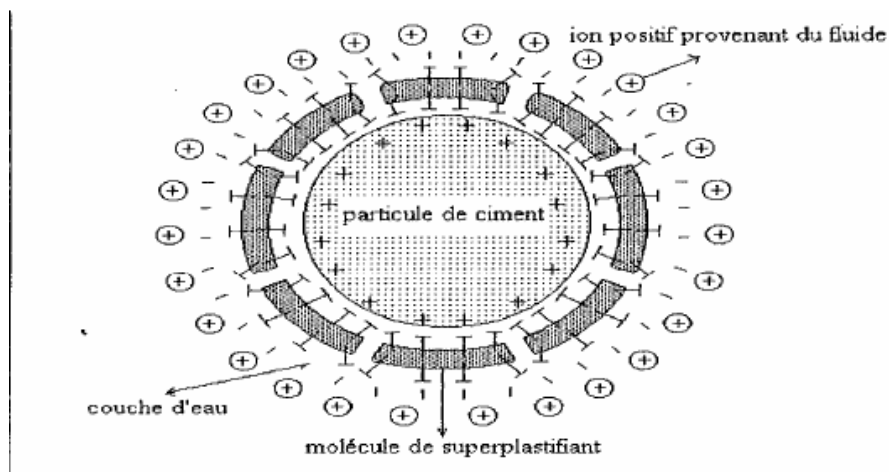


Figure 15. Mode d'action d'une molécule de superplastifiant [32]

❖ Fonctions des adjuvants

Les adjuvants possèdent une fonction principale et une fonction secondaire:

- **Fonction Principale** : Chaque adjuvant est défini par une fonction principale unique. Elle est caractérisée par la ou les modifications majeures qu'elle apporte aux propriétés du béton à l'état frais ou durci. Cette fonction peut varier selon le dosage de l'adjuvant et les matériaux utilisés.
- **Fonctions secondaires** : En plus de sa fonction principale, un adjuvant peut avoir une ou plusieurs fonctions secondaires (ex: plastifiant-retardataire, retardataire-plastifiant-réducteur d'eau). Il y'a beaucoup de paramètres à prendre en considération lors de la manipulation de ces adjuvants tels que : dosage, la convenance, l'interaction de plusieurs adjuvants, le mode d'introduction ... Qui sont très bien détaillés dans la référence [18].

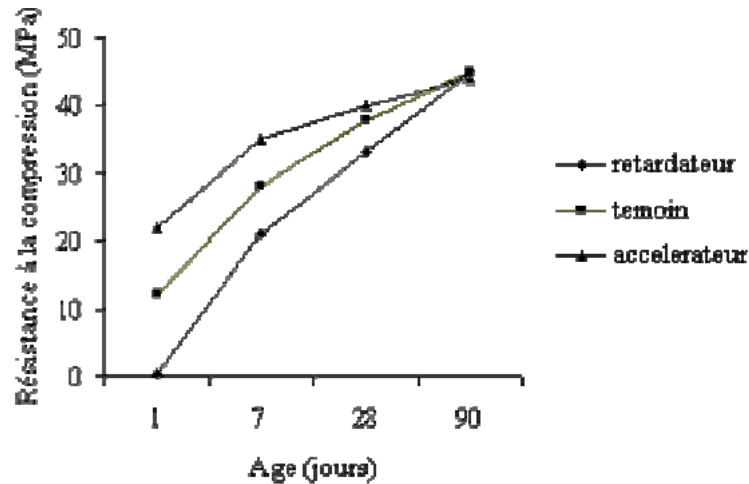


Figure 16. Influence d'un accélérateur et un retardateur sur l'évolution des résistances [32]

A titre d'exemple on cite les travaux de [33] où elle a étudié la formulation et propriétés d'un béton adjuvanté par polycarboxylate, elle a employé deux types d'adjuvant avec différents rapports E/C pour voir leurs influence sur l'affaissement et la résistance mécanique.

3. Principes de formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- Une très faible teneur en eau ;
- Une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

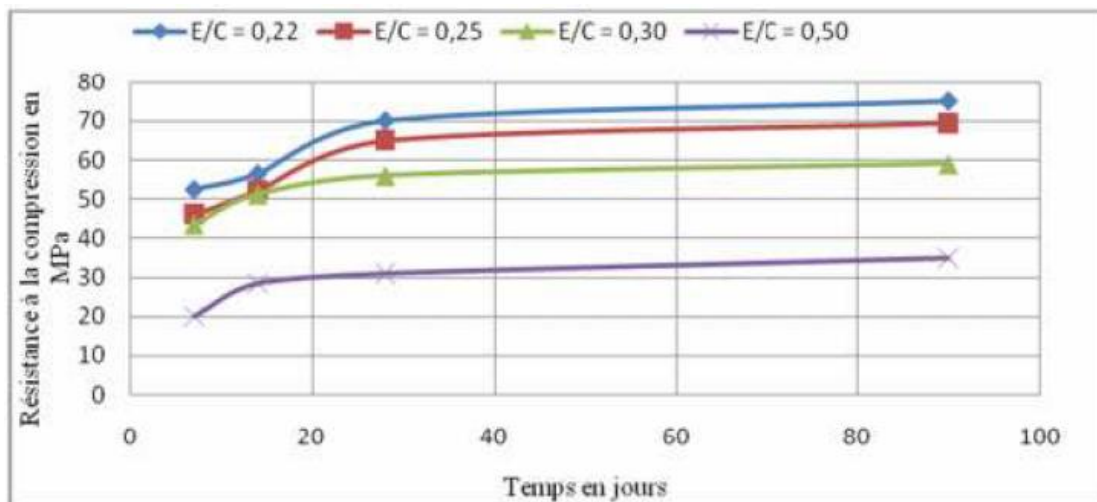


Figure 17. Evolution de la résistance à la compression de béton en fonction du temps et du rapport E/C [34]

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

→ **Détermination d'une formule théorique prévisionnelle**

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- Détermination des proportions des constituants ;
- Optimisation du squelette granulaire.

→ Optimisation du mélange en laboratoire

- Validation de la compatibilité ciment / adjuvant ;
- Justement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation ;
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (Température).

→ Validation de la formule en centrale

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- Vérification des caractéristiques du béton.

✚ Deux démarches sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP :

1. Défloculation des grains de ciment

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale. Les rapports Eau /Liant sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur en particulier de performances à court terme.

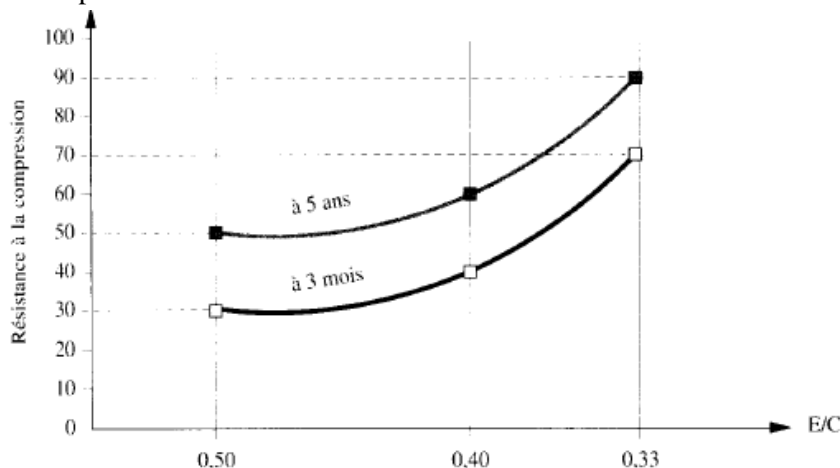


Figure 18. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C [18]

2. Optimisation du squelette granulaire

Les performances des BHP peuvent encore être optimisées par l'extension du spectre granulaire grâce, en particulier à l'ajout de particules ultrafines. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice [34]. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides inter-granulaires, mais présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique.

On adaptera également chaque classe granulaire afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats).

La première démarche peut-être utilisée seule et permet déjà des gains de propriété importants (en terme de résistance mécanique, on peut ainsi atteindre des bétons de classe de résistance C 60/75). La seconde voie implique obligatoirement le recours simultané à l'emploi de superplastifiants, elle permet d'obtenir de nouveaux gains de performances.

4. Caractérisation des BHP

4.1. Caractéristiques physiques

❖ Ouvrabilité

Elle peut se définir par la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage. Ce facteur primordial peut varier comme pour les bétons classiques et l'on obtient facilement des affaissements au cône d'Abrams appelés slumps de 15 à 18 cm [18], mais il faut impérativement étudier :

- les granulats (module de finesse du sable) ;
- le choix du ciment et du superplastifiant ;
- les dosages de ces différents matériaux, de la fumée de silice et de l'eau pour la plasticité désirée, en fonction des plus ou moins grandes difficultés de mise en œuvre dans les coffrages et l'embaras des armatures ;
- la plasticité désirée qui doit être garantie au moins une heure après le malaxage pour tenir compte des délais inévitables de transport et de mise en œuvre [35, 36].

L'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs : type et quantité de ciment ; type et quantité de sable ; teneur en eau ; aspect et grosseur des agrégats.

La fluidité du mélange de béton croît avec l'augmentation de la quantité d'eau. Le mortier de ciment, non seulement remplit les vides et enrobe les grains des agrégats, mais les écarte également les uns des autres, en créant entre eux des couches abondantes qui diminuent le frottement entre les grains : ceci augmente la fluidité.

Si les agrégats sont plus gros, la surface spécifique est en général moindre, par conséquent, pour une même quantité de mortier de ciment, les couches intermédiaires entre les grains des agrégats se trouvent plus épaisses ce qui rend le mélange de béton plus fluide.

L'augmentation de la quantité de sable au-dessus de la quantité optimale, diminue la fluidité de la pâte par suite de l'accroissement de la surface totale des agrégats.

La forme des grains influe sur la fluidité, si la surface des grains est arrondie et lisse, la surface de contact et le frottement entre eux seront plus petits donc le mélange plus fluide que le mélange formé avec des granulats concassés.

❖ Porosité

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. En d'autres termes, la phase liquide se sature avec différents ions qui se combinent ensuite pour former les différents produits d'hydratation qui occupent progressivement une partie de l'espace initialement rempli d'eau.

Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, les mouvements de l'eau dans le système deviennent de plus en plus difficiles, si bien que l'hydratation des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion.

Quel que soit l'instant durant la réaction d'hydratation, les espaces non remplis par des produits solides (hydrates et particules de ciment anhydre) pourront être considérés comme des vides ou des pores capillaires [23]

Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les propriétés physiques et mécaniques du béton.

La porosité est essentiellement fonction du rapport E/C du béton. Il a été démontré que pour un béton donné, la seule réduction du rapport E/C de 0,5 à 0,22, réduit d'un facteur 3 le volume total des pores capillaires.

❖ Perméabilité

La perméabilité est caractérisée par la valeur de débit de transport des fluides et des gaz (eau, chlorure, sulfates, oxygène...) à travers des pores capillaires et des fissures du béton, est fonction de plusieurs facteurs cité par [37]

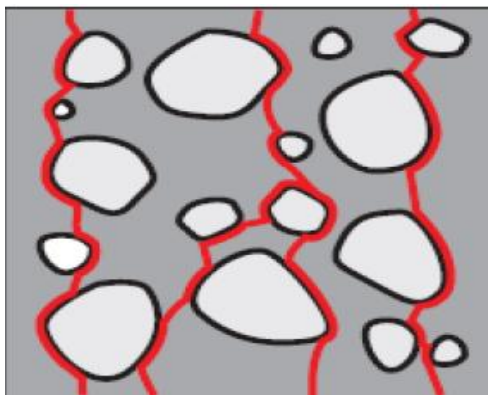
A cause de leur très grande compacité, les BHP ne sont que très peu perméables. On peut s'en rendre compte lorsqu'on brise des échantillons de béton conservés pendant un an dans l'eau, on constate que le cœur de l'éprouvette est absolument sec.

Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieur du béton tout en le rendant encore plus imperméable.

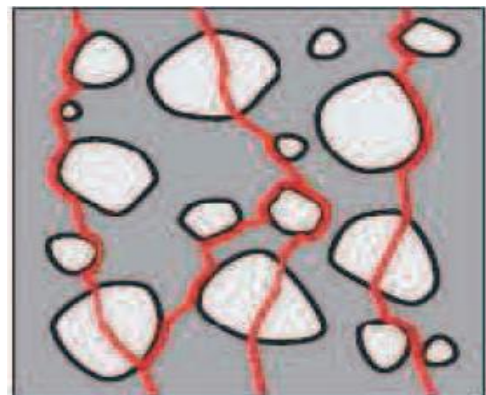
4. 2. Caractéristiques mécaniques

4. 2. 1. La résistance à la compression

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (figure 19).



(a) : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier



(b) : les granulats sont également fissurés

Figure 19. Etat des fissures dans un béton ordinaire (a) et BHP (b)

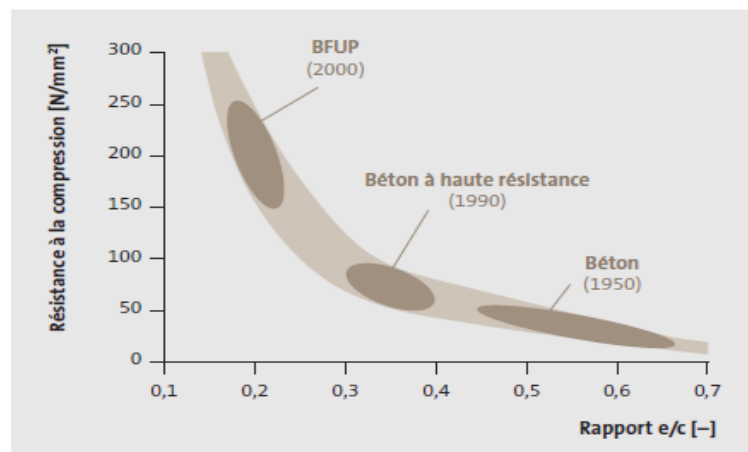


Figure 20. Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression [38]

Sur le diagramme contrainte-déformation (Figure 21), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton ordinaire. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle.

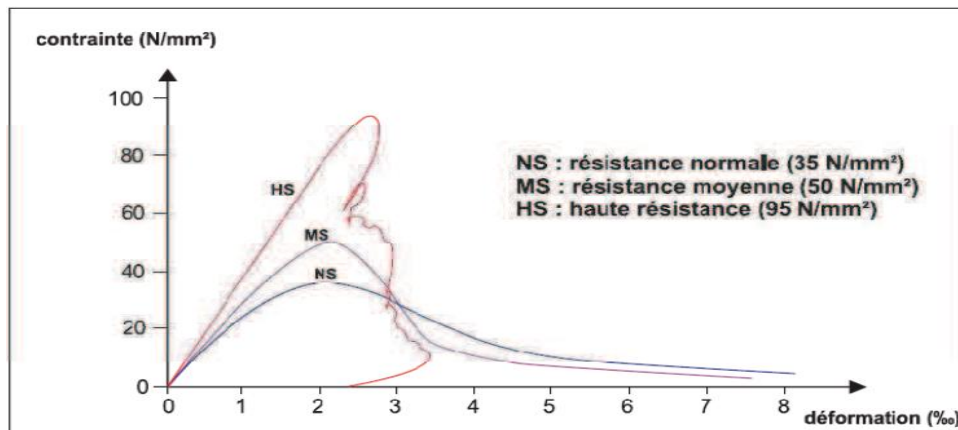


Figure 21. Diagramme contraintes-déformation. [31]

4. 2. 2. La rigidité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est toujours lié à la résistance à la compression, tel était les travaux de [6] ou il a étudié la déformabilité et le module d'élasticité d'un BHP en employant la fumée de silice et la pouzzolane naturelle.

4. 2. 3. Le retrait

Le béton à hautes performances est comme le béton ordinaire, il est soumis à un retrait plastique, à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation.

Le retrait est à la fois un phénomène simple dans sa manifestation – une diminution du volume apparent du béton – mais aussi assez complexe quand on veut bien comprendre les phénomènes sous-jacents et les mécanismes mis en jeu (Baron cité par [3]). Il vaudrait mieux parler des retraits du béton plutôt du retrait du béton parce que le retrait global que l'on mesure correspond à la combinaison de plusieurs retraits élémentaires [39]

- le retrait plastique qui se développe à la surface d'un béton frais exposé au séchage;
- le retrait endogène (aussi appelé retrait d'auto dessiccation ou retrait chimique) qui peut se développer quand le ciment
- le retrait de séchage qui se développe quand l'eau s'évapore d'un béton en atmosphère sèche ;
- le retrait thermique induit par la diminution de la température du béton (contraction thermique) ;
- le retrait de carbonatation.

Tous les bétons, quel que soit leur rapport eau/liant, peuvent développer du retrait endogène, mais, dans le cas des bétons usuels, ce retrait est négligeable, ce qui n'est pas le cas dans les BHP où, plus le rapport eau/liant est faible, plus le retrait endogène peut être élevé.

Comme toute contraction chimique de la pâte de ciment entraîne une réduction du volume absolu de 10 % et comme un BHP a une teneur en ciment plus élevée que celle d'un béton usuel, on pourrait penser qu'un BHP peut développer plus de retrait endogène.

Cependant, s'il est continuellement conservé sous l'eau dès que son hydratation commence, on le verra même augmenter de volume apparent.

4. 2. 4. Le fluage

Le fluage du béton à hautes performances est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton ordinaire. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP [36] et les BFHP [35, 40]. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par

fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il est de même en ce qui concerne le béton ordinaire.

La norme EN 1992-1-1 définit les formules nécessaires au calcul du fluage ; il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %.

4. 2. 5. Durabilité

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, ...etc . Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoiqu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes [13, 17, 41] (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...etc).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Une allusion au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène) est déjà faite ci-dessus.

La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction. Dans ce cadre, il faut signaler que Les laitiers offrent une bonne résistance aux agressions chimiques.

5. Le développement des BHP en Algérie

L'Algérie est l'un des pays en voie de développement, il adapte le programme de développement durable dans tous les domaines surtout dans le domaine de l'industrie de construction, donc il est nécessaire de fabriquer des bétons durables.

Les développements récents en technologie des ciments et des ajouts cimentaires (fumée de silice, pouzzolane naturelle) et des superplastifiants ont mené à la production du béton à haute résistance (≥ 50 MPa) [4]. Sa haute résistance est une fonction inverse de son contenu de vide total. Ainsi, le critère crucial dans la production du béton de haute résistance est l'utilisation de systèmes de rapport E/C (Eau/Ciment) bas, couplée à une consolidation optimale et la cure du béton Plusieurs autres de ses caractéristiques s'améliorent : la maniabilité, le module d'élasticité, la résistance à la flexion, la perméabilité et la durabilité [34].

L'utilisation des Bétons à Hautes Performances (BHP) et BFHP ainsi que leur dosage [42] est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art. Le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux (superplastifiant, fumée de silice, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite. Il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile des structures. En effet, ce choix a des effets sur les activités d'inspection, d'entretien et de réparation ainsi que sur sa disposition à la fin de sa vie utile. De plus, ces effets touchent également les usagers de la structure, la société, etc., donc le BHP est le béton le plus économique à long terme.

Des études portées sur le comportement mécanique des bétons à base des différents types d'ajouts (fumée de silice, pouzzolane naturelle) [6] et leurs effets sur la résistance ainsi que le module d'élasticité, même de déchet de polissage de carrelage est réutilisé comme filler dans le but de recycler ce déchet polluant [4]. L'utilisation également de sable des dunes encourageant la valorisation des produits locaux [31] destinés aux ouvrages en milieu agressif et très agressif [43].

Synthèse d'état de l'art des BHP

La formulation et la fabrication de bétons dont la résistance en compression à 28 jours atteint plus de 50 MPa voire 80 MPa est aujourd'hui de pratique courante. De nombreux ouvrages ont été exécutés en BHP ces dernières années. Cette "banalisation" des BHP est rendue possible par la disponibilité du produit au sein des marchés nationaux.

Ces BHP sont en général formulés avec des granulats locaux. Les centrales à béton sont équipées des automatismes, des process de fabrication, des procédés de dosages et des procédures de contrôle rigoureuses assurant la reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication des BHP.

L'usage simultané des superplastifiants (pour diminuer le E/C) et des ajouts minéraux ultra-fin élimine la faiblesse des résistances initiale des bétons due à l'usage des ajouts minéraux fins dont la réaction d'hydratation est lente comparée au ciment Portland. Les résistances à un âge plus avancé seront obtenues par l'hydratation des ajouts minéraux fins. La durabilité de ces bétons est assurée par une amélioration de la microstructure par affinage des pores par l'hydratation des ajouts cimentaires.

À cause de problèmes d'environnement (émission des gaz à effet de serre) et grâce à l'effet bénéfique des ajouts minéraux et des adjuvants chimiques sur les propriétés des bétons, les ciments occuperont une place privilégiée dans les matériaux de construction de demain.

• Type et proportion des composants

- ciment ; ajouts minéraux ; adjuvants chimiques ; granulats.

• Rapport eau/liant

Il influe sur la microstructure du matériau et notamment sur la porosité : plus il est élevé, plus la porosité le sera, entraînant une modification des caractéristiques du matériau.

• Conditions d'essai

- la durée de l'essai ;
- le type de moule ;
- les dimensions des échantillons ;
- les surfaces extrêmes des cylindres ;
- la vitesse de chargement ;
- le type de machine ;
- l'ambiance.

De nombreux atouts justifient l'utilisation, la compétitivité économique et la banalisation de l'emploi des BHP pour les ouvrages courants.

• En phase de conception

- Simplification des sections.
- Simplification des ferraillements.
- Optimisation possible de la géométrie de l'ouvrage.
- Allègement des structures.

• En phase de construction

- Économie de matière (granulats en particulier).
- Gain de poids, donc simplification des fondations et des méthodes de construction.
- Réduction des délais d'exécution.
- Optimisation des cycles de construction et de la productivité.
- Minimisation de l'incidence des intempéries sur les phasages de construction.

• En phase de service

- Durabilité augmentée. Frais d'entretien réduit.
- Allongement de la durée d'exploitation de l'ouvrage. Maintenance réduite.

Il en résulte des ouvrages plus durables, nécessitant moins d'entretien à des coûts globaux comparables économiques.

Chapitre 2

La valorisation du verre dans les BHP

Introduction

L'utilisation des ajouts cimentaires tels que la fumée de silice [44], les cendres volantes [45] ainsi que les laitiers est une activité courante au monde en raison des conditions climatiques de chaque pays. La poudre de verre est un matériau pouzzolanique [46] et présente ainsi l'avantage de remplacer partiellement ces matériaux cimentaires. Il est rapporté qu'un taux de remplacement partiel de 20% du ciment portland par la poudre de verre [27] a des effets bénéfiques sur le développement des propriétés mécaniques et sur la durabilité du béton. Le taux d'incorporation optimal de la poudre de verre peut varier en fonction du rapport E/L, le dosage en liant et leur interaction. Il est difficile de déterminer l'effet de l'interaction entre les paramètres de formulation sur les propriétés du béton par les méthodes conventionnelles. Les facteurs sont; le rapport E/L, le taux d'incorporation de verre et le dosage en liant. Tous les modèles statistiques sont valides pour des rapports E/L entre 0,35 et 0,60 [47, 48, 3] des pourcentages de la poudre de verre entre 10% et 40% et des dosages en liant entre 335 kg/m et 415 kg/m. Des mélanges de validation sont utilisés pour évaluer la fiabilité des modèles proposés. Le rapport E/L est le paramètre qui a le plus d'influence sur la résistance en compression à tous les âges et sur la perméabilité aux ions chlorures à 28 jours. Par contre, le taux d'incorporation de la Poudre de verre a le plus d'influence sur la perméabilité aux ions chlorure à 56, 91 et 180 jours grâce à la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre. Elles montrent que l'incorporation de 20% de la poudre de verre aux bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 procure une perméabilité aux ions chlorures inférieure à 1500 Coulombs à 56 jours. Cette valeur de perméabilité peut être obtenue à 56 jours en remplaçant 30% du ciment par la poudre de verre quelque soit le rapport E/L considéré. Une valeur de la résistance en compression à 28 jours de 35 MPa peut être obtenue en utilisant des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant 20% de poudre de verre. Cette valeur de la résistance à 28 jours peut être obtenue aussi avec des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,42 et contenant 30% de poudre de verre. Des mélanges binaires et ternaires proportionnés avec un rapport E/L de 0,45 et incorporant de la poudre de verre affichent des bonnes propriétés mécaniques, ainsi que des bonnes caractéristiques de durabilité dans les milieux agressifs [48]. Ces bétons développent des gains significatifs des propriétés mécaniques entre 28 et 90 jours. L'utilisation de la poudre de verre comme un ajout cimentaire alternatif présente une issue très intéressante pour avoir des bétons durables .

1. Le verre dans les bétons

L'incorporation de la PV dans le béton en remplacement du ciment constitue un avantage économique et écologique. L'utilisation de la PV en remplacement du ciment entraînerait d'une part la réduction de la quantité de ciment utilisée dans la construction et d'autre part la durabilité des ouvrages. Des études menées sur la perméabilité aux ions chlorure du béton incorporant la PV montre que ce dernier présente une très bonne résistance à la pénétration des ions chlorure. Un avantage écologique important de l'usage de la PV dans le béton est qu'une bonne quantité de verres mixte sera détournée des sites d'enfouissement.

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons, Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflé et fissuré cité par [3].

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une quinzaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54].

Le verre peut être incorporé dans un béton suivant deux approches. Sous forme de granulats [51, 55, 56, 57, 58] ou en tant qu'addition cimentaire [59, 60]. Incorporer le verre en tant que granulats a l'avantage d'utiliser de grands volumes de matière et ne nécessite pas de concassage fin. Mais la principale préoccupation dans une telle application est le risque de réaction alcali-granat. En ce qui concerne les additions de verre finement broyé, elles ont l'avantage de présenter une activité pouzzolanique et, d'un point de vue environnemental et économique [61], de limiter la quantité de ciment consommé. La poudre de verre ne présente pas de propriétés liantes, mais une réactivité pouzzolanique ; les auteurs la substituent au ciment dans des proportions allant jusqu'à 40% en masse [62]

1. 1. Ouvrabilité

Certains travaux montrent une légère diminution de l'ouvrabilité avec le taux de substitution du ciment par du verre sous forme de fine [63]. Ce comportement est attribué à la géométrie des particules et à la réduction du module de finesse. En revanche, d'autres auteurs ne notent qu'un effet négligeable sur la demande en eau ou en superplastifiant [47].

1. 2. Influence de la finesse

La finesse joue un rôle primordial dans la réactivité du verre comme été montré dans les travaux de [50] [64]. Il est reconnu que les fines réagissent de manière pouzzolanique et contribuent au développement des performances du béton [52, 65], alors que sous forme de granulats [66], une réaction alcali-silice peut apparaître. La figure I.22 montre l'influence du diamètre des particules de verre sur l'expansion d'un mortier. On peut aussi noter que la finesse a un impact sur le développement de la résistance à la compression. L'activité pouzzolanique augmente ainsi avec la finesse de la poudre, ce qui confirme d'autres études. Shao et al [67] ont ainsi montré qu'un diamètre inférieur à 75 µm est favorable pour le développement des réactions pouzzolaniques.

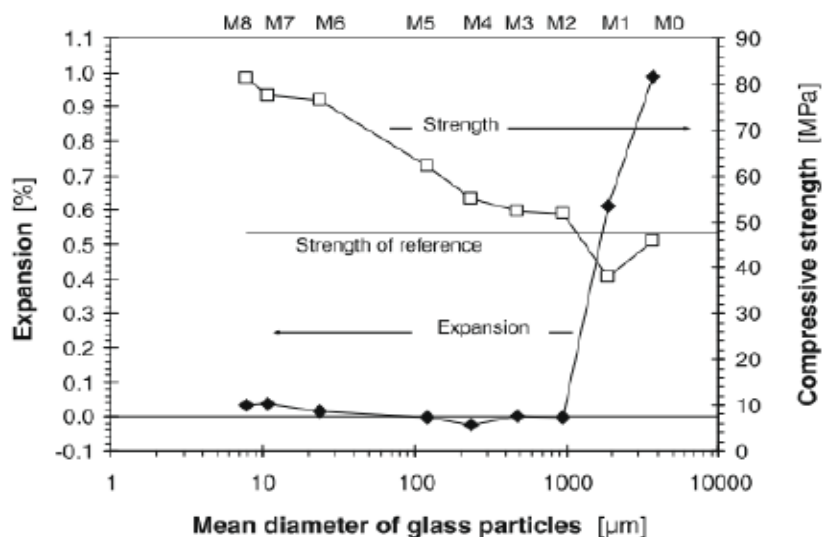


Figure 22 : Influence du diamètre des particules de verre sur l'expansion et le développement de la résistance en compression [27].

1. 3. Prise et hydratation

Schwartz et al [63] ont montré qu'un remplacement de 10% du ciment par de la poudre de verre accélère l'hydratation du ciment au jeune âge. Cet effet est attribué à la forte teneur en alcalins qui tendent à

accélérer l'hydratation du ciment. Au-delà de 14 jours, l'effet de dilution du ciment est prépondérant sur la réaction pouzzolanique. D'autres études montrent que la poudre finement broyée ($d_{0,5}=38 \mu\text{m}$) améliore aussi bien les propriétés mécaniques au jeune âge qu'à long terme [3]. Il est toutefois important de laisser le temps aux fines de réagir puisque l'effet pouzzolanique se développe lentement.

1. 4. Performances et durabilité

Les premières études concernant l'incorporation de poudre verre impliquaient l'alcali-réaction [68]. Le verre contient en effet une forte teneur en alcalins, susceptible d'engendrer des réactions avec les granulats. Des études ont montré l'absence, voire la réduction du risque de réaction alcali-silice [27, 63]. Il a été confirmé que ces observations d'inhibition sont reliées à la capacité d'absorption des alcalins par les C-S-H produits [50], qui présenteraient un rapport C/S inférieur à la normale.

Il est généralement reporté que la poudre de verre améliore les paramètres de durabilité des bétons [69]. Il est souvent suggéré que la poudre de verre présente des propriétés pouzzolaniques similaires aux cendres volantes [47]. La perméabilité aux ions chlorure mesurée par la méthode ASTM C1202-1997 est fortement améliorée [63]. De plus, la perméabilité des bétons à la poudre de verre après 56 jours de murissement est bien moins dépendante du rapport E/L qu'un témoin confectionné avec du ciment Portland. Cet effet est attribué à la réactivité pouzzolanique du matériau qui affinerait et segmenterait la porosité des bétons [47].

1. 5. Retrait de séchage et retrait endogène

➤ Retrait de séchage

Le retrait de séchage d'un béton est une variation dimensionnelle, essentiellement due à l'évaporation de l'eau libre contenue dans le béton et par l'hydratation de ses constituants dans le temps. Le retrait de séchage des bétons ayant de rapports E/L élevés ($\geq 0,50$) incorporant la poudre de verre est similaire à celui du témoin. Alors que les bétons de faibles rapports E/L ($\leq 0,40$) incorporant la poudre de verre présentent un retrait de séchage plus élevé que celui du béton témoin [50]. Ces observations reflètent un effet négligeable de la poudre de verre sur le retrait de séchage des bétons ayant E/L élevé et un effet assez perceptible sur le retrait de séchage des bétons ayant E/L faible [47]. Le retrait de séchage d'un béton ayant E/L = 0,49 incorporant 20 % de poudre de verre est du même ordre de grandeur voire légèrement inférieur à celui du béton témoin remarqué par Shayan cité par [48]. Cependant, des bétons incorporant 30 % de poudre de verre ont présenté un retrait supérieur à celui du béton témoin, sans toutefois excéder la limite maximale de retrait recommandée par la norme Australienne AS 3600 qui est de 0,075 % à 56 jours. Dans l'étude de Shayan, l'effet de la poudre de verre sur le retrait de séchage semble dépendre de la teneur en poudre de verre dans les bétons. L'augmentation du retrait de séchage des bétons avec le taux d'incorporation de la poudre de verre a été également rapportée par Danilova [50].

➤ Retrait endogène

La poudre de verre affecte différemment à court et à long terme le retrait endogène des bétons ayant un rapport E/L de 0,40. La poudre de verre diminue considérablement le retrait endogène à court terme alors qu'elle l'augmente à long terme [50]. La diminution du retrait endogène est attribuée aux particules de la poudre de verre qui semblent inertes à jeune âge et empêchent le retrait de façon analogue aux granulats. L'augmentation du retrait endogène à long terme est liée d'une part à l'apport des alcalis par la poudre de verre dans le système et d'autre part à la réaction pouzzolanique qui consomme une partie de l'eau contenue dans la pâte, réduisant ainsi la quantité d'eau entre les feuillets de C-S-H. L'augmentation du retrait endogène des bétons de faibles rapports E/L en présence de la poudre de verre est également rapportée par Danilova [50]. La réaction pouzzolanique de la poudre de verre contribuant à l'affinage des pores en les segmentant d'avantage, favorise conséquemment la formation des ménisques très courbés qui

occasionnent de fortes dépressions internes et augmentent la contraction volumétrique et donc le retrait endogène.

1. 6. Résistance au gel dégel

La poudre de verre n'a pas d'effet préjudiciable sur les résistances au gel-dégel des bétons. Des bétons de différents rapports E/L notamment 0,55 et 0,40 et incorporant différents taux (20 ou 30%) de poudre de verre présentent des facteurs de durabilité au gel dégel, évalués selon la norme ASTM C666, nettement supérieurs à 98 %, traduisant de très bonnes résistances de ces bétons au gel-dégel [47]. De même, des bétons légers autoplaçants incorporant la poudre de verre développent également une bonne résistance au gel et dégel [54]. L'aptitude de la poudre de verre à améliorer la résistance au gel-dégel du béton a également été confirmée par les travaux de Turgut cité par [48]. Il se dégageait des résultats de cet auteur une augmentation de la réduction de la perte de masse avec l'augmentation du taux de substitution par la poudre de verre.

1. 7. Résistance à l'écaillage

L'écaillage des bétons avec poudre de verre est fortement contrôlé par le rapport E/L. En effet, des bétons ayant un rapport E/L élevé (E/L= 0,55) incorporant la poudre de verre présentent de faibles résistances à l'écaillage (pertes de masse à l'écaillage, alors que les bétons ayant un rapport E/L faible (E/L = 0,40) présentent de bonnes résistances à l'écaillage [47, 70]. La résistance à l'écaillage des bétons contenant la poudre de verre est plus sensible à la variation du rapport E/L que sa résistance au gel-dégel en l'absence de sels de déverglaçage. Les caractéristiques du réseau de bulles d'air entraîné contribuent beaucoup à l'amélioration de la résistance à l'écaillage des bétons avec poudre de verre. Un prolongement de la durée de cure humide avant l'application des cycles de gel-dégel favorise également l'amélioration de la résistance à l'écaillage des bétons avec poudre de verre ayant E/L faible.

1. 8. Pénétrabilité des ions chlorure

L'incorporation de la poudre de verre entraîne une réduction de l'interconnectivité des pores plus ou moins relativement proportionnelle au taux de substitution [71]. La réduction de la connectivité des pores est liée à l'augmentation de la tortuosité des pores due à leur remplissage par des produits d'hydratation et aussi par de fines particules de verre non hydratées.

La poudre de verre réduit significativement la pénétrabilité aux ions chlore. Elle contribuerait par conséquent, à l'amélioration de la durabilité des bétons. Les mélanges incorporant la poudre de verre ont une bonne résistance à la pénétrabilité aux ions chlore, réduisant ainsi les risques de corrosion d'armatures du béton [5].

La pénétrabilité des ions chlorure mesurée à 91 jours sur des bétons de E/L = 0,55 contenant de la poudre de verre est identique à celle obtenue sur des bétons de E/L = 0,40, malgré le fait que ces derniers aient un faible dosage en eau et élevé en liant [47] (figure I. 23). Des observations semblables ont été également rapportées par [70], qui a étudié une poudre de verre finement broyé de finesse de l'ordre de 555 m²/kg.

1. 9. Diffusion d'humidité

Les études conduites par Schwarz [72], portant sur l'évaluation des paramètres de transport d'humidité dans le béton tels que la constante B8, le coefficient de diffusion et la sorptivité ont montré qu'à 14 jours, la constante B ou le coefficient de diffusion sont plus élevés pour les mélanges incorporant les ajouts par rapport au témoin. Par contre à 91 jours, ces paramètres sont plus faibles dans les mélanges incorporant les ajouts indiquant l'effet de réactivité lente des ajouts. Que ce soit à 14 jours ou à 91 jours, la sorptivité à court et long terme des mélanges contenant de la poudre de verre est similaire ou légèrement supérieure à celle du témoin. Bien que ces mélanges aient une perméabilité plus faible que le témoin, ils facilitent plus l'absorption capillaire.

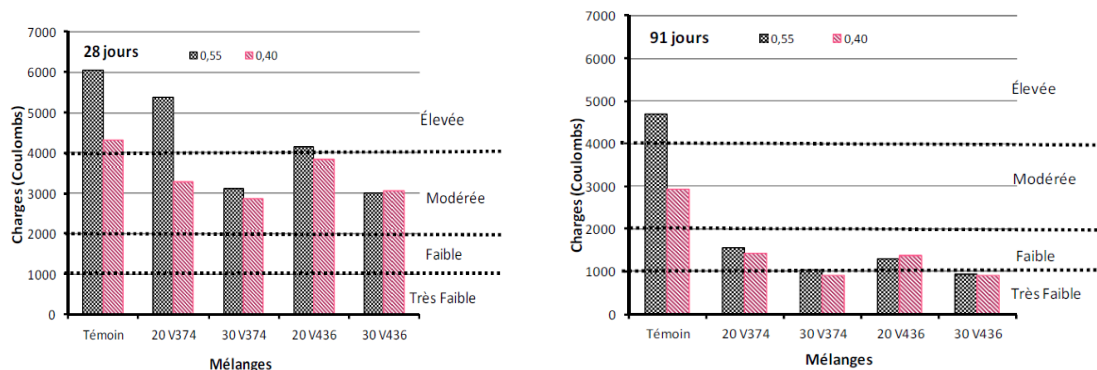


Figure 23. Pénétrabilité des ions chlorure des bétons ayant $E/L = 0,55$ et $0,40$ contenant de la poudre de verre à 28 et 91 jours de murissement [47]

2. La Poudre de verre comparée à d'autres ajouts

La réactivité pouzzolanique peut être comparée à celle des cendres volantes (Figure 24), par contre, la cinétique de la réaction de la PV est plus rapide, étant donné que les cendres volante ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est suffisante [63]. En effet, dans le cas du verre, celui-ci apporte lui-même les alcalins nécessaires au déclenchement de la réaction. Le verre sodocalcique possède environ 13 % d'alcalins susceptibles à produire le gel de réaction alcalis-silice. Par contre, étant finement broyé le verre ne le produit pas [39/3]. Bien au contraire, il est capable de diminuer l'influence néfaste des granulats réactifs.

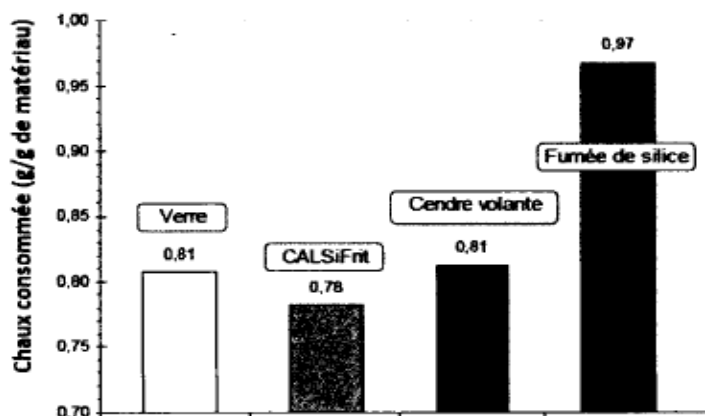


Figure 24. Quantités de chaux consommées par les différents matériaux, test Chapelle : 16 heures dans une solution de chaux (matériau/chaux-1) à 100°C [3]

La PV en consommant certaine quantité d'eau et jusqu'à 50 % de CH produit par l'hydratation du ciment Portland donne naissance au gel de C-S-H de type C-(N, K)-S-H. La quantité totale de C-S-H, qui inclut le C-S-H ordinaire et C-S-H de PV, augmente avec le temps et la quantité de PV. Les micrographies MEB montre une densification de la microstructure des matrices cimentaires par la PV [15]. La densification autour de grains de PV due à leur partielle hydratation et, donc, à la formation de C-S-H additionnel a été rapporté par Idir [3].

Par l'interaction avec le C_3S (pâte de C_3S pure), des analyses de résonance magnétique nucléaire (RMN) montrent que la PV cause l'augmentation du degré de polycondensation des silicates (allongement de leurs chaînes). Le rapport des intensités des pics des C-S-H polymérisés sur ceux des C-S-H monomères passe de 1,6 (phase hydratée issue de C_3S seul) à 2,0.

Malgré que les hydrates issus des particules fines de verre piègent des alcalins, une partie suffisamment importante reste en solution interstitielle. De plus, les ions de Na^+ apportés dans la solution par des particules fines de verre entraînent la solubilité d'étringite et libèrent, par conséquent les ions de SO_2 dans la solution. Suite à la fixation (physique ou chimique) de ces ions dans la structure du gel de C-S-H, celle-ci se densifie et se renforce.

Toutefois, dans l'étude de Barbarulo citée par [50] en présence de la soude (NaOH) les sulfates restent en solution et la fixation sur le C-S-H est très faible. Ainsi, les ions de SO_4 passés en solution sont susceptibles de former dans le temps un étringite secondaire, ce qui a un effet néfaste sur la durabilité du béton.

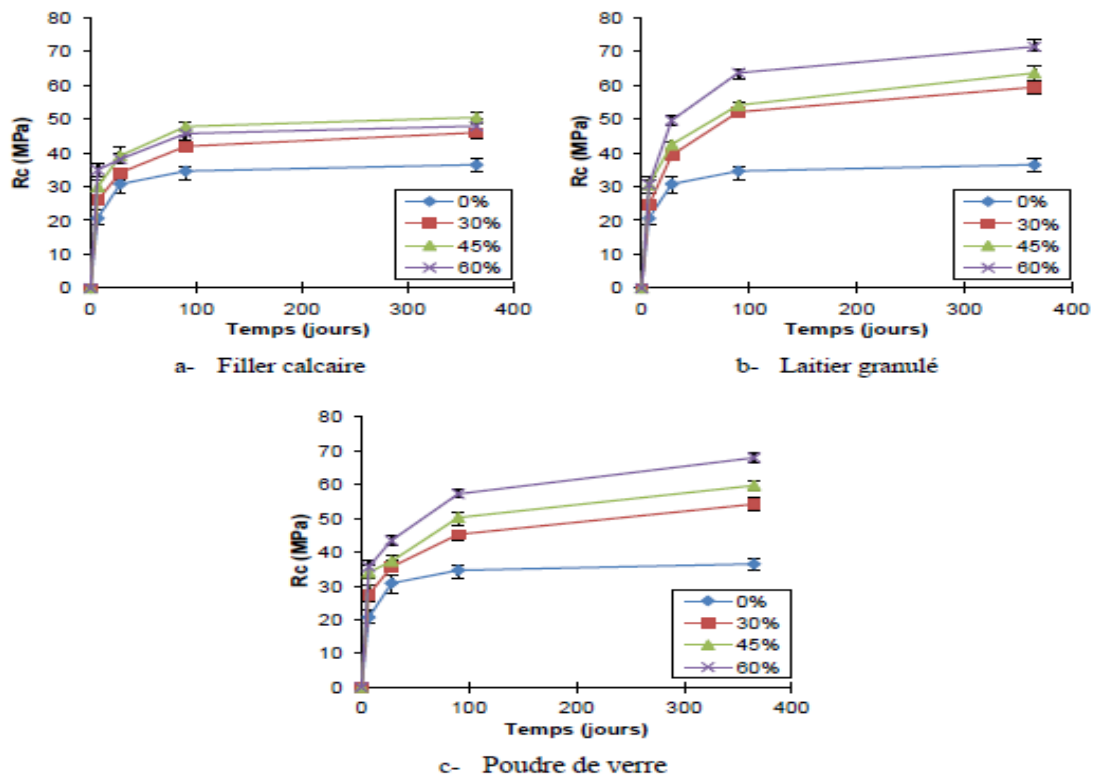


Figure 25. Evolution de la cinétique de durcissement en fonction de la nature et du dosage des additions (avec fumée de silice) [24]

3. Utilisation simultanée de la PV avec les ajouts cimentaires classiques

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoire ont été conduites, l'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane connue, notamment la FS, la CV ou le MK, en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi, l'utilisation de la PV serait plus intéressante en combinaison avec un ajout cimentaire d'une grande réactivité que son emploi individuel [47]

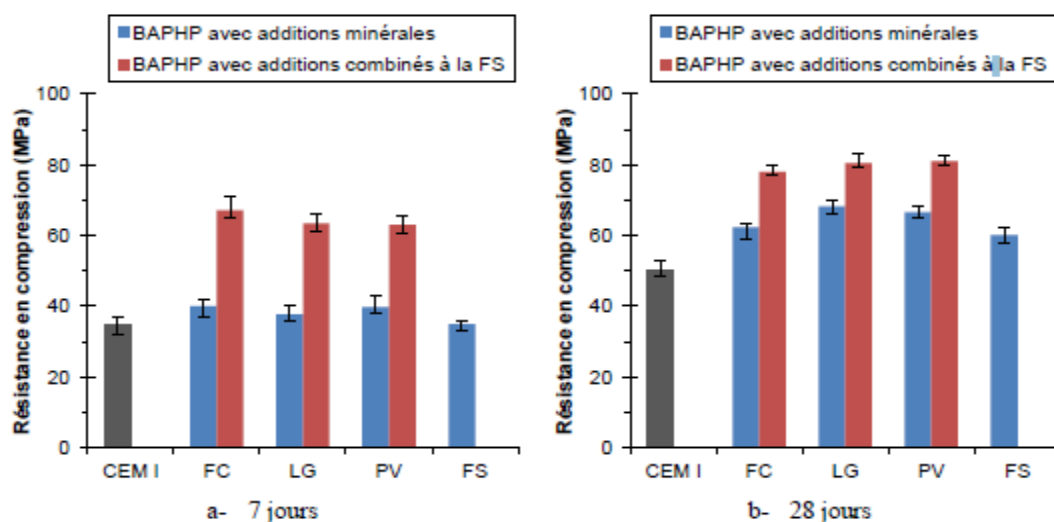


Figure 26. Influence des additions sur la résistance en compression des BAPHP à 7 et 28 jours [24]

4. Avantages des bétons à base de poudre de verre

Le verre occupe 15% de l'ensemble des matières recyclables domestiques et le terme «Micronisation» représente l'opération ayant pour objet la réduction d'un corps solide (pigment ou abrasif) en particules ayant des dimensions de l'ordre du micromètre (ou micron) [73]

➤ Pour un béton plus vert

Réduit l'émission de gaz à effet de serre : chaque tonne de poudre de verre utilisée en remplacement du ciment dans le béton contribue à réduire de près d'une tonne d'émission de gaz à effet de serre

Détourne une matière valorisable des sites d'enfouissement

Diminue l'extraction de ressources naturelles en offrant une alternative: produit post-consommation valorisé et recyclé

La poudre de verre :

Ne contient pas de composés organiques volatiles

Est composée à 100% de matière recyclée

Diminue les effets de l'extraction et la transformation de matière vierge

Réduit la formation des îlots de chaleur

Est une ressource locale

➤ Pour un béton plus performant

Diminue l'expansion due à la RAG

Améliore l'imperméabilité aux ions chlore

Permet jusqu'à 20% de gain d'ouvrabilité

Diminue jusqu'à 40% les apports d'air et d'eau

Réduit de 15% les dosages d'adjuvants nécessaires

Accroît la résistance en compression à moyen terme

Améliore la performance lorsque la poudre de verre est utilisée comme ajout ternaire avec la fumée de silice

Diminue la porosité

Diminue le retrait de séchage

Offre une bonne résistance au gel-dégel

Procure une bonne résistance à l'écaillage avec une faible quantité d'eau

➤ Pour un béton plus économique

Prix avantageux par rapport au prix du ciment : 130 à 180 \$ la tonne ciment et 130 à 150 \$ la tonne poudre de verre [73]

Réduction de l'apport en eau et en adjuvants
Diminution des coûts de travaux de finition (polissage, peinture)
Ouvrages en béton plus durables

➤ **Réalisation et essai in situ au Canada**

Musée des beaux-arts (Montréal) : Trottoir

Maison du développement durable (Montréal): Dalle intérieure et trottoir

Tricentris, centre de tri (Gatineau) : Murs porteurs et Blocs architecturaux, blocs de béton réguliers

Ville de Montréal : trottoir

Jansen industries à Boucherville : Mur anti bruit

Société des alcools du Québec : Plancher de béton avec poudre et granulats de verre

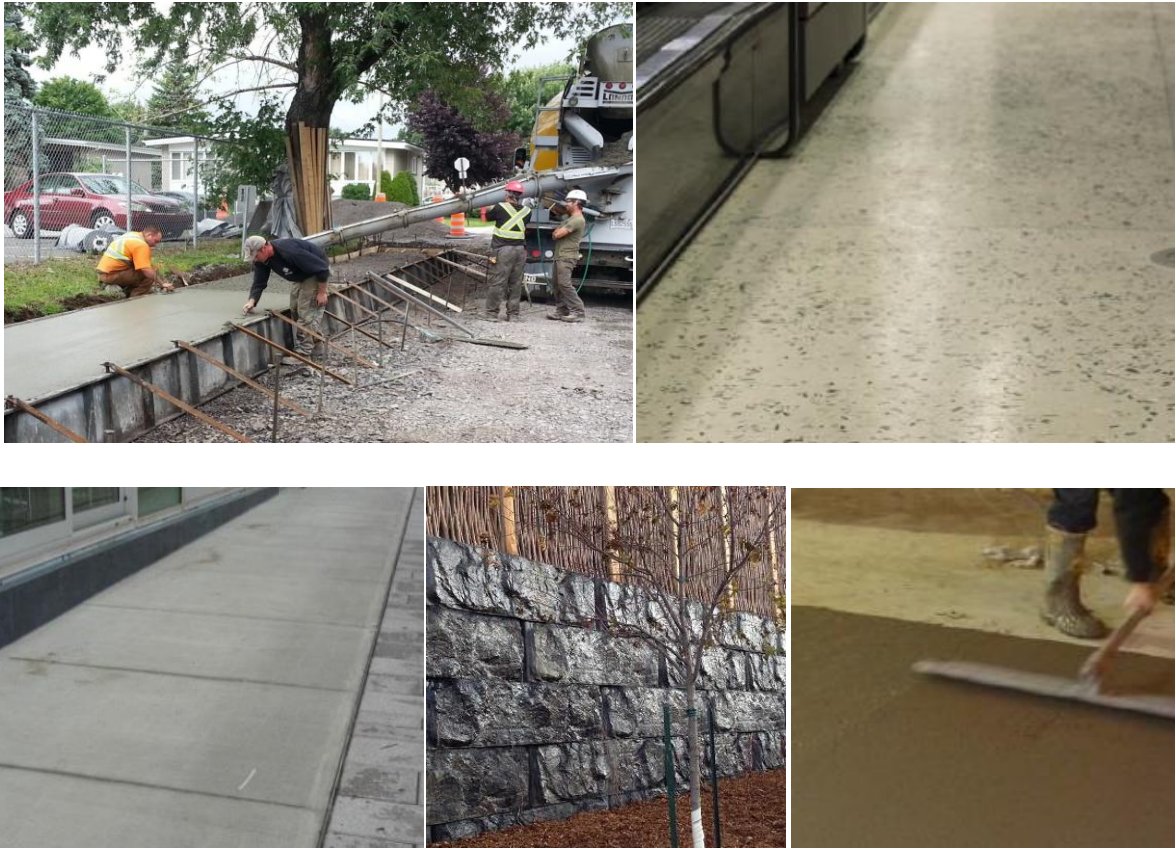


Figure 27. Quelques projets de construction réalisés au Canada à base de verre recyclé

5. Réaction alcali-silice et Réaction pouzzolanique du verre

Les réactions alcali-silice et pouzzolanique impliquent les mêmes composés - silice, alcalins, calcium et hydroxydes - et produisent toutes deux des gels amorphes.

D'une part, les granulats contenant de la silice amorphe peuvent réagir avec les alcalins du ciment dans la solution interstitielle des pores du béton, quand celui-ci est exposé à des conditions d'humidité. Le produit de réaction est un gel silico-alcalin qui peut entraîner des expansions et des fissures dans le béton (la réaction alcali-silice). D'autre part, dans les mêmes conditions, les mêmes matériaux finement broyés peuvent réagir avec la chaux libre du ciment, formant ainsi des hydrates ayant des propriétés liantes (réaction pouzzolanique).

La réaction pouzzolanique permet d'améliorer les propriétés du béton, notamment le durcissement et la durabilité. Il est aujourd'hui reconnu qu'elle représente l'un des meilleurs moyens de réduire les expansions du béton contenant des granulats alcali-réactifs.

5. 1. La réaction alcali-silice

5. 1. 1. Définition et son mécanisme de production

Une pathologie, la réaction alcali-granulats (ou alcali-réaction), qui affecte les bétons et que les chercheurs ont surnommée « le cancer des bétons ». Sous ce terme se regroupent toutes les réactions chimiques qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment.

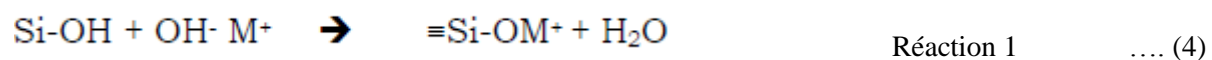
Le développement du phénomène de la réaction alcali-granulats dans les bétons nécessite la conjugaison de trois conditions:

- présence d'un granulats potentiellement réactif;
- humidité relative supérieure à 80-85% ;
- concentration en alcalins au-dessus d'un seuil critique.

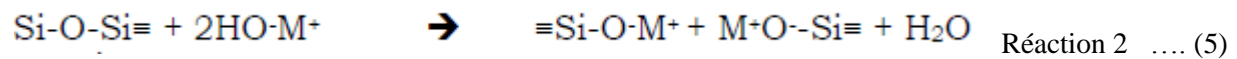
Il existe trois grands types de réaction alcali-granulats: les réactions alcali carbonate, alcali-silice et alcali-silicate. La réaction la plus fréquemment rencontrée est la réaction alcali-silice.

Les désordres occasionnés par l'alcali-réaction se présentent sous forme de faïençage ou d'éclatement du béton. Ces réactions n'apparaissent en général qu'après plusieurs dizaines d'années. Cependant si les trois conditions précédemment citées sont remplies, avec notamment une forte réactivité des granulats et une forte teneur en alcalins, une alcali-réaction peut se développer en quelques années.

La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines années après la fabrication du béton. Les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives. Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle.



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situés plus profondément a lieu ensuite :



Avec (M = Na ou K)

De façon simplifiée, l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit Figure 28

-Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.

-Migration des ions OH⁻, Na⁺ et K⁺ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.

- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.

-Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.

-Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydrate alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na⁺ et K⁺ ainsi que l'eau.

-Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.

-Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.

-Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

La présence de gels d'alcali-réaction étant associée, dans le béton, à l'existence d'une fissuration anarchique et évolutive, on leur accorde volontiers des propriétés gonflantes. Différentes théories tentent d'expliquer l'origine de ces gonflements.

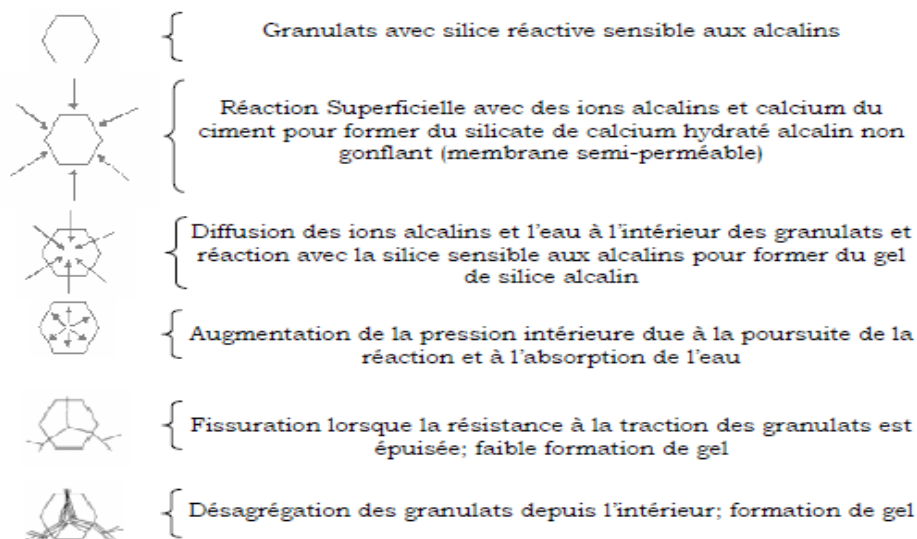


Figure 28. Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [SPRUNG et coll., 1998] cité par [3]

5. 1. 2. Facteurs affectant la réaction alcali-silice

Des travaux antérieurs ont permis de montrer que différents paramètres affectent la réaction alcali-silice :

- La taille des granules réactifs a un impact important sur les gonflements entraînés par la réaction
Cependant la taille des granules qui provoquerait des gonflements réactifs semble dépendre de la nature des granules réactifs.

-Beaucoup d'études ont montré qu'il existe une teneur "pessimum" de granules réactifs dans le béton qui causerait une expansion maximale.

- Comme toute autre réaction, la réaction alcali-silice est sensible à la température

- L'eau est un ingrédient important pour la réaction alcali-silice car elle est à la fois le milieu de transport des espaces ioniques et fait partie des produits de la réaction. Sa disponibilité est donc un paramètre essentiel pour la réaction. Il est conclu que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative >80 % est nécessaire un rapport eau/ciment de 0,4] provoquerait aussi des expansions [74]

- La teneur en alcalins équivalents est une donnée importante vis à vis des gonflements : plus la teneur initiale en alcalins est forte plus important est le gonflement obtenu.

Cependant la méthode la plus commune pour réduire (ou pour éviter) l'expansion est d'incorporer des matériaux pouzzolaniques (15-30 % du poids de ciment) ou l'utilisation des ciments de laitiers.

5. 1. 3. Réaction alcali-silice du verre

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau, en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons.

De même que la pouzzolanite, la réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres.

La bibliographie montre que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granules de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

- **La taille des grains de verre**

La taille des particules des granules de verre a une influence sur l'expansion due à la RAS. Il semblerait que l'expansion augmente avec le diamètre des granules réactifs. En effet, dans le cas du verre, diverses études ont montré que diminuer la finesse du verre entraînait la RAS. Cependant, dans la plupart de ces

travaux les auteurs ont travaillé en terme de finesse non pas en terme de taille des grains. De ce fait il a été difficile de déterminer la taille des grains de verre qui est susceptible de provoquer des gonflements.

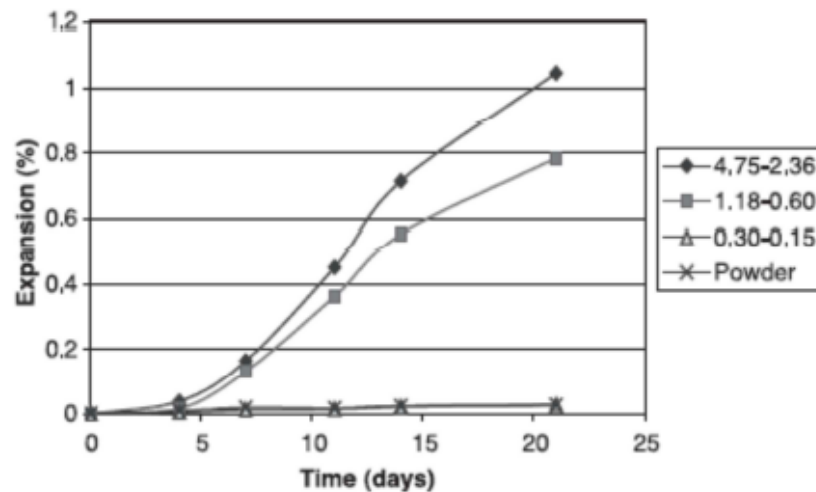


Figure 29. Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles, Shayan et al. cité par [48]

- **Teneur en verre**

Cette tendance varie selon les auteurs, et nous pouvons les cataloguer en trois groupes. Le premier qui affirme que l'expansion des bétons augmenterait avec leur teneur en verre, le second avance l'inverse, et enfin le dernier que les gonflements des bétons ne changerait pas en fonction de leur teneur en verre. Ces oppositions s'expliquent vraisemblablement dans les conditions de déroulement des travaux.

- **La porosité et la réaction alcali-silice du verre**

En plus d'utiliser des pouzzolanes telles que la fumée de silice la cendre volante ou le metakaolin, pour réduire l'expansion provoquée par des granulats réactifs, on constate que l'utilisation de granulats poreux réduit ces expansions. La poudre de verre malgré sa forte teneur en alcalis réduit considérablement l'expansion due à la réaction alcali-silice, sans l'inhiber complètement [3, 47].

5. 2. La réaction pouzzolanique

5. 2. 1. Définition et mécanisme de production

A l'origine, l'appellation d'une pouzzolane se limitait aux cendres volcaniques qui se forment naturellement ainsi qu'aux argiles calcinées qui peuvent réagir avec la chaux, en présence d'eau et à température ambiante. Ce terme a ensuite été élargi pour couvrir d'autres matériaux artificiels ou naturels, silico-alumineux ou siliceux, qui en présence d'eau réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés qui possèdent des propriétés liantes.

La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + Eau \Rightarrow silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés

La propriété pouzzolanique se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice amorphe ou dont le réseau cristallin est fortement défectueux.

L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer. (Thermodynamique)

La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane. (Cinétique)

Les produits de la réaction pouzzolanique sont des gels amorphes de type C-S-H, avec des rapports Ca/Si généralement bien inférieurs à ceux des C-S-H du ciment.

Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre a été évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton a base de ciment ou sur des mortiers a base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG, DRX.

La Figure 1.30 rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 réalisée par [3] qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre a la résistance du mélange témoin.

Il a été difficile, voire impossible, de rassembler des travaux tous faits dans des mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes se dégagent nettement :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique du verre : plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique ;
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente ;
3. Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc ;
4. Pour des résistances optimales, il est plus intéressant de substituer le sable que le ciment par le verre
5. Une température élevée joue un rôle important dans l'activation du verre ;
6. Le verre, comparé à d'autres pouzzolanes notamment la cendre volante, développe rapidement son activité pouzzolanique ;
7. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane en remplacement partiel du ciment pourrait conduire a des synergies intéressantes

La réaction pouzzolanique de la poudre est fonction de la taille des particules de verre semble être fortement affectée par le dosage en eau du béton. En effet, les effets d'amélioration des propriétés du béton résultant de l'activité pouzzolanique du verre sont nettement plus perceptibles dans les bétons ayant des rapports E/L élevés que dans ceux ayant E/L faibles [47].

5. 2. 2 Facteurs affectant la réaction pouzzolanique

Pour les mélanges ciment (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité.

Capacités du gel C-S-H de la pâte de ciment à fixer les alcalins

La force attractive de la surface du gel de C-S-H ne devrait pas être sous-estimée, elle est assez importante pour entraîner la fixation des alcalins.

Le gel de C-S-H occupe environ 70% du volume de la pâte de ciment hydratée. Les alcalins peuvent être piégés ou relâchés par ces gels, ce qui influence beaucoup les propriétés et la durabilité du béton,

Compte tenu du fait que les C-S-H possèdent un important rapport surface/volume, la forme de fixation la plus commune et la plus rencontrée dans les états de fixation des alcalins dans le gel des C-S-H est la forme adsorbée. Par conséquent, c'est la capacité d'adsorption de la surface des C-S-H qui détermine les possibilités de fixation des alcalins sur le gel des C-S-H.

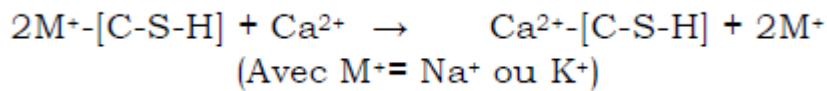
Actuellement, les études établies sur la capacité de la surface du gel de C-S-H à adsorber les alcalins et les facteurs contribuant a ce mécanisme ne sont pas nombreuses.

Une fois l'hydratation du ciment commencée, la concentration de la solution en alcalins devient de plus en plus importante ; effet du a la dissolution des alcalins du ciment. La proportion des divers contre-ions adsorbés a la surface des C-S-H devient graduellement en équilibre avec la composition de la solution interstitielle.

La proportion d'alcalins parmi les contre-ions adsorbés par les C-S-H augmente avec l'augmentation de la concentration en alcalins de la solution. On peut présumer que la plupart du temps, a la fin, les ions adsorbés a la surface des C-S-H sont des ions alcalins. L'augmentation de la quantité d'eau dans la pâte

libérerait ces alcalins par échange ionique et entraîne ainsi leur diffusion sous l'action du gradient de concentration.

La réaction d'échange ionique peut être décrite comme suit :



..... (6)

La Figure I. 30 représente schéma récapitulatif illustrant les deux réactions: alcali-silice et pouzzolanique inspiré des travaux de Iddir [27, 62]

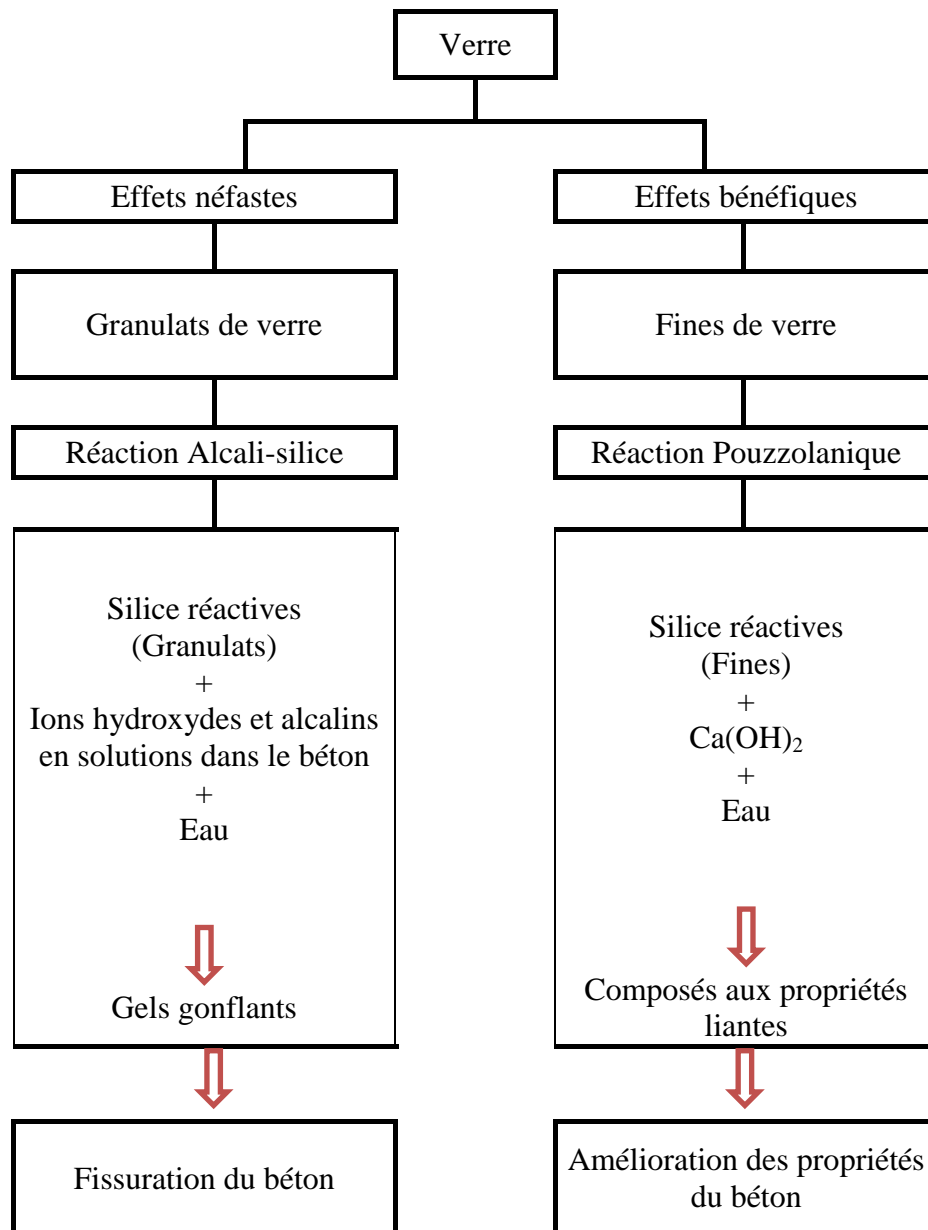


Figure 30: Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions: alcali-silice et pouzzolanique

6. L'Algérie et l'utilisation de la poudre de verre

L'Algérie est loin de l'innovation d'utilisation de la poudre de verre dans la production des mortiers et bétons, comme tous les autres pays du monde sauf le Canada qui a envahi ce domaine de recyclage du

verre, après des années de recherche l'équipe du professeur Arezki Tagnit- Hamou enseignant chercheur et titulaire de la Chaire SAQ [75] de valorisation du verre dans les matériaux a pu mettre en évidence ce projet de recherche en le mettant en exécution et par conséquent la réalisation de plusieurs projets cités dans [73] avec de la poudre de verre comme ajout cimentaire .

[5] ont monté expérimentalement que les bétons avec poudre de verre présentent un bon comportement structural au niveau du béton armé avec différentes types de ferrailage. Pour une même configuration des étriers et une même géométrie des poteaux, les bétons avec PV présentent le même comportement élastique et une ductilité quasi semblable à celui de son témoin. Les bétons avec 20% de PV pour un rapport E/L=0,40 pourrait éventuellement être utilisé dans la confection d'ouvrage d'art. Les résultats obtenus montrent aussi que l'ajout de la poudre de verre en remplacement de la masse du ciment réduit de manière significative la perméabilité aux ions chlore du béton. Le béton avec PV présente une meilleure résistance à la pénétration des ions chlorures que son témoin équivalent comme c'été montré déjà dans les travaux de [47].

Ces dernières années en Algérie quelques projets de recherche dans ce contexte en vue la lumière, tel été les travaux de recherche de Boucetta [24] ou il a étudié les BHP et les bétons autoplaçants à base de poudre de verre ; laitier granulé, filler calcaire combiné a la fumée de silice en détaillant le comportement mécanique et rhéologique de ces mélanges. Ces résultats obtenus permettaient d'envisager la substitution du filler calcaire par le laitier granulé et la poudre de verre dans les BAP à des dosages de 45 à 60% par rapport à la masse du ciment. (Figure 1)

Zerroub en 2012 [15] a formulé un béton a haute performance a base du ce même ajouts en substituant jusqu'à 30% du ciment et les résultats montraient que l'ajout de la poudre du verre améliore l'écoulement du béton tout en gardant la même quantité de superplastifiant, aussi elle consolide d'avantage la matrice cimentaire ce qui rend difficile la pénétration des composés agressif dans le béton. (Figure 32)

Quand a Zeghichi [76] , elle a traité à partir de son étude l'influence de l'addition de la poudre de verre broyé sur le comportement physique et mécanique du ciment blanc, composé et du mortier ; en variant le pourcentage d'ajout de 10%, 20%, 25%, 30% et 35%, et afin d'accélérer l'hydratation de ces ciments elle propose d'effectuer un traitement thermique par étuvage. Les résultats obtenus ont montré qu'une substitution partielle de 10% à 25% semble être favorable, au-delà de cette limite les propriétés mécaniques sont affectées. (Figure 33)

Les travaux de [77] ont montré qu'en travaillant avec les deux rations, on conclut que les bétons préparés avec W/C sont plus résistants que ceux préparés avec W/B et justifiés par la diminution de la quantité d'eau par le remplacement de poudre de verre 20% de ciment avec CEM II42.5, Cependant une consistance ferme de béton a été obtenue.

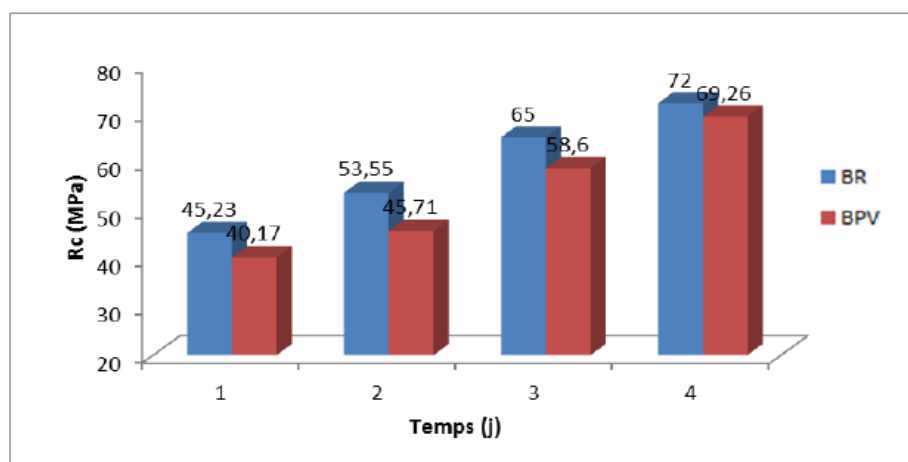


Figure 32. Résistance à la compression des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet [15]

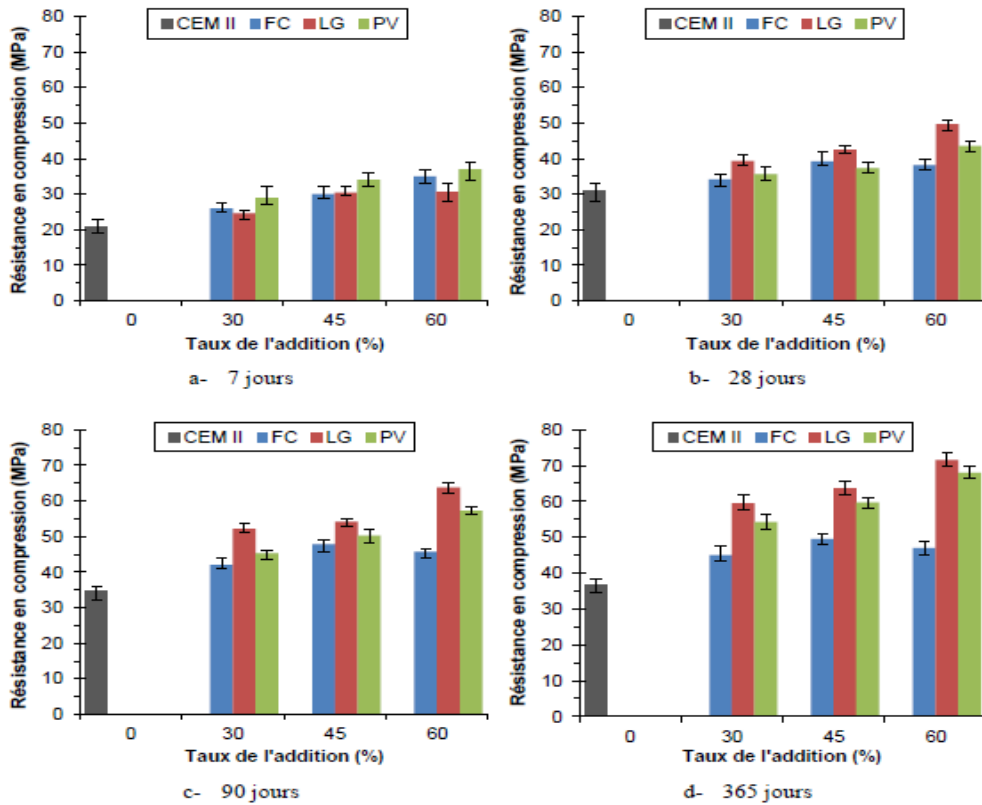


Figure 31. Influence du dosage en addition sur la résistance en compression à différents âges [24]

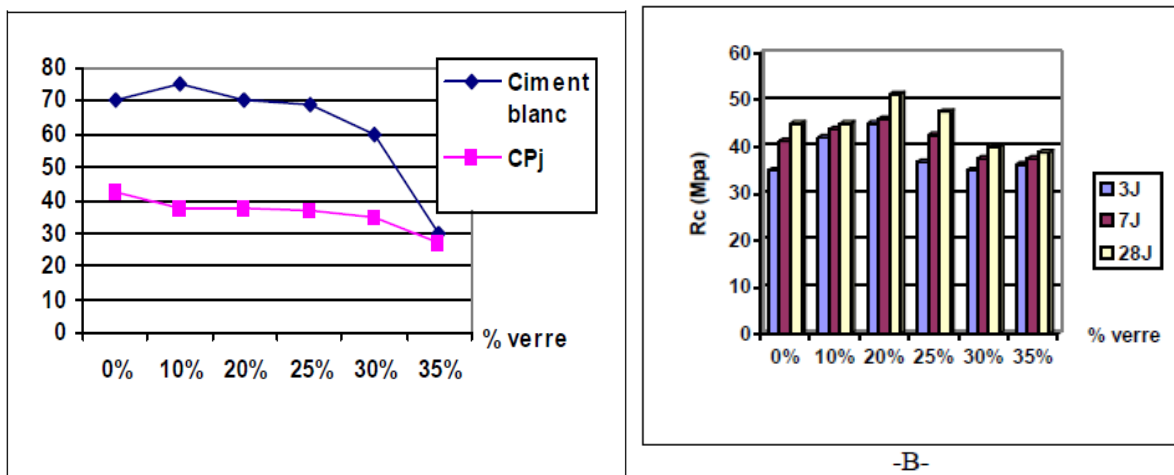


Figure 33. Résistance en compression en fonction de la teneur en verre.
 A : L'effet de l'étuvage sur la résistance en compression B: CPj [76]

Synthèse d'état de l'art des BPV

La plupart des travaux s'intéressant à l'incorporation de la poudre de verre dans les bétons ont traité principalement les effets de la poudre de verre sur certains aspects de la durabilité incluant la résistance à la réaction alcalis-granulat, à la pénétration des ions chlorure, aux variations dimensionnelles notamment le retrait de séchage et le retrait endogène, à la résistance au gel-dégel et écaillage des bétons. Il ressort de ces études antérieures que la poudre de verre présente une très bonne performance dans la réduction de la

pénétrabilité des ions chlorure, développe de bonnes résistances au gel-dégel en l'absence de sels fondants. La résistance à l'écaillage des bétons incorporant la poudre de verre est fortement influencée par le rapport E/L et son taux d'incorporation. Pour des taux d'incorporation de 20% de poudre de verre dans les bétons ayant des rapports E/L strictement inférieurs à 0,45. Les bétons ayant des rapports E/L élevés contenant de la poudre de verre présentent généralement un retrait de séchage similaire voire légèrement supérieur à celui du béton témoin, alors que ceux ayant des rapports E/L faibles présentent un retrait endogène systématiquement plus élevé que celui du témoin à cause de la fine porosité de leur matrice. Tous les travaux ayant abordé l'effet de poudre de verre sur la réaction alcalis granulats, rapportent que le verre finement broyé atténue incontestablement l'expansion due à la réaction alcalis granulats, malgré sa forte teneur en alcalis. Au vu des aspects de durabilité des bétons contenant de la poudre de verre considérés dans les études antérieures, la poudre de verre ne présente pas d'effet négatif sur la durabilité des bétons. Au contraire des améliorations substantielles sont observées sur la plupart de ces paramètres de durabilité des bétons en présence de la poudre de verre.

Cependant, il est à remarquer que les travaux effectués jusqu'à date sur les bétons incorporant la poudre de verre ne couvrent pas entièrement tous les grands aspects de la durabilité de ces types de bétons. Par ailleurs, la poudre de verre semble recéler des performances intéressantes avec l'augmentation du rapport E/L des bétons. Ceci laisse prétendre par des hypothèses, que la poudre de verre a besoin de plus d'eau et de temps pour s'hydrater et développer tous ses potentiels. Or, il est bien connu que la qualité et la durabilité des bétons varient inversement avec leur dosage en eau. Donc, il s'avère indispensable et très pertinent de chercher non seulement à comprendre et élucider ce comportement que recèle la poudre de verre en fonction du dosage en eau des bétons, mais aussi et surtout d'étudier la durabilité de ces bétons ayant différents rapports E/L contenant de la poudre de verre dans des milieux agressifs tels que les milieux riches en chlorure, en sulfates et en CO₂.

Les essais sur mortiers ont permis d'examiner l'activité pouzzolanique des poudres ainsi que leur performance dans le contrôle de la réaction alcalis-grulats (RAG). Les effets de la poudre de verre sur les propriétés à l'état frais des bétons et leur performance dans le béton à l'état durci sont évalués. Les résultats de nos études permettent de retenir que :

- La poudre de verre, de finesse similaire à celle de ciment, améliore l'ouvrabilité et son maintien dans le temps pour les systèmes cimentaires binaires étudiés. La demande en superplastifiant des systèmes cimentaires binaires est inférieure à celle du témoin [47]
- La poudre de verre broyé recèle un potentiel pouzzolanique intéressant [62]
- La poudre réduit l'expansion due à la RAG tant dans les mortiers que dans les bétons [3]
- Dans les bétons avec E/L = 0,40, la poudre de verre réduit la demande en superplastifiant mais augmente le dosage en agent entraîneur d'air (AEA) [47]
- La poudre a une réactivité lente occasionnant de faibles résistances à jeune âge [59, 15]
- Les bétons contenant la poudre de verre résistent au gel-dégel et s'écaillent moins
- La poudre améliore la durabilité des bétons par réduction de leur pénétrabilité
- La poudre peut remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans le béton [3]

Enfin, cette étude bibliographique a montré que les bétons de verre ont été étudiés et a confirmé que l'utilisation du verre dans les bétons est bien possible. Nous avons vu aussi que la taille des grains influence l'effet qu'apporte le verre au béton :

* L'incorporation du verre sous forme de fine améliore les résistances en compression des bétons

* L'utilisation du verre sous forme de granulats entraîne des gonflements liés à la réaction alcali-silice.

En revanche, les avis diffèrent quant à la taille ou se manifeste l'effet négatif du verre. Cette taille dépend de plusieurs paramètres :

-type du verre (composition chimique du verre), -teneur du mélange en verre,

-utilisation du verre en remplacement de ciment ou de sable,

-utilisation d'autres fines minérales, -nature des fines minérales utilisées ainsi que utilisation d'adjuvants

Chapitre 3

La Durabilité Chimique des Bétons Contenant des Ajouts

Introduction

Avec les caractéristiques mécaniques présentées dans les chapitres précédents, les propriétés de durabilité des bétons sont aussi d'une importance capitale. En effet, bien que la résistance mécanique ait été choisie comme critère d'équivalence entre les divers bétons, l'objectif de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons à hautes performances.

La durabilité peut être, donc, définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévues pour l'ouvrage. Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte de ciment. Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieur du matériau solide [78].

Les ajouts minéraux ou ajouts cimentaires sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive ou amorphe. Ils peuvent posséder des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ils peuvent également présenter des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la portlandite pour former des C-S-H. Cette réaction est particulièrement intéressante puisque la portlandite, qui contribue peu à la résistance, est remplacée par des C-S-H qui sont responsables des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement d'une partie du ciment dans le béton présente plusieurs aspects bénéfiques. Ces matériaux, étant généralement des sous produits industriels, leur valorisation dans le béton est non seulement économique mais également écologique. De plus, ces ajouts ont des effets sur certaines propriétés du béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. La maniabilité et le ressuage du béton frais sont influencés par la forme géométrique et la finesse des particules des ajouts [79].

Les ajouts cimentaires affecte aussi la cinétique d'hydratation et l'évolution de la résistance dans le temps. À long terme, la composition des hydrates et la porosité qui résultent de l'hydratation des ajouts cimentaires peuvent varier par rapport à celles résultant de l'hydratation du ciment [80]. Ces différences microstructurales sont susceptibles d'influencer divers aspects de la durabilité, notamment la résistance aux agressions chimiques et les propriétés de transport. La diminution de la perméabilité du béton contenant des ajouts minéraux est considérée comme un des aspects importants de leurs effets bénéfiques. Plusieurs études citées par [48] ont montré que les pâtes de ciment contenant des ajouts minéraux tels que les cendres volantes, la fumée de silice et les cendres de balles de riz présentent une porosité totale considérablement réduite avec un réseau capillaire plus affiné, comparativement à celle des pâtes témoins de ciment portland. Ces changements sont qualitativement en corrélation avec la réduction de la perméabilité. La réaction pouzzolanique semble permettre de développer un système poreux discontinu plus facilement [81]. Une étude conduite par Feldman, 1984, rapporte qu'une insuffisance de cure adéquate d'un béton contenant des cendres volantes, affecte sérieusement sa perméabilité.

La réduction considérable de la taille des pores dans la pâte contenant de la fumée de silice est attribuée à la fois à sa réactivité pouzzolanique élevée et aussi à la très petite taille des particules qui lui permettent de s'insérer efficacement entre les grains de ciment, en subdivisant ainsi les pores (effet filler). Les coefficients de perméabilité à l'eau sont considérablement réduits plus particulièrement à des rapports E/L élevés [82].

1. Facteurs influençant la Durabilité

La durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle et la comparaison des BHP et BAP avec les bétons vibrés ou ordinaire nécessitent la détermination de certaines propriétés physico-chimiques.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique.

La perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités mécaniques et protectrices (à l'égard de la corrosion des armatures principalement). La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression, la diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. D'autre part, les trois fluides naturels qui peuvent se déplacer selon les processus mentionnés ci-dessus et remettre en cause la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone.

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles.

Bien que dans la réalité les différents mécanismes de transfert agissent simultanément, ceux-ci sont examinés (en laboratoire) séparément afin d'apprécier les propriétés fondamentales en jeu. Différents essais ont donc été réalisés pour quantifier les propriétés révélatrices de ces processus de dégradation physico-chimique du matériau BHP. La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BHP. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons à hautes performances et autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel – dégel, la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures, Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton.

L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros). En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus.

2. Les attaques chimiques des bétons

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De part sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de

ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [78]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone.

2. 1. Actions des acides

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium, et neutres (pH = 7) voire acides (pH < 7). Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium.

La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés solides contenant ces espèces se dissolvent. La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale. La lixiviation commence par la dissolution de la portlandite, puis des monosulfoaluminates, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient ;



Figure 34. Carotte de béton (320 kg/m³ de ciment CEM I 42,5 R, E/C 0,5) soumise pendant 27 jours à des cycles d'attaque à l'acide acétique (pH 4- 4,5). A titre de comparaison, à droite, une carotte de béton identique, non soumise aux essais [83]

2. 1. 1. Sources des acides

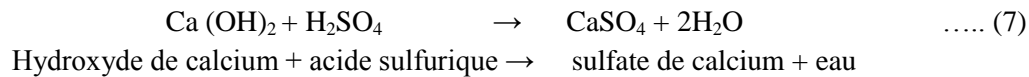
Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

2. 1. 2. Mécanisme d'attaque

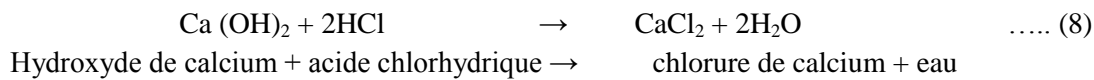
L'acide sulfurique (H₂SO₄) avec l'acide chlorhydrique (HCl) sont classés comme les menaces naturelles les plus agressives. Lorsque le béton est exposé à un environnement contenant de l'acide sulfurique, il subit une sévère dégradation due à des réactions de neutralisation.

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. L'acide sulfurique (formule I.7) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule I.8 décrit la réaction entre l'acide chloridrique et la portlandite.



Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [84].

2. 1. 3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des C-S-H plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [65]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [81]. La littérature est riche en résultats sur l'effet des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires dans les milieux acides, nous citons à titre d'exemple quelques travaux essentiels :

Laoufi et al [68] ont montré que l'incorporation de la pouzzolane naturelle d'Algérie est bénéfique pour la durabilité des mortiers puisqu'elle permet de résister aux agressions acides. Il apparaît clairement que tous les mortiers pouzzolaniques 10, 20 et 30% de PN ont bien résisté à l'attaque acide [H₂SO₄] à tous les âges étudiés dans ce travail, de plus ils ont mieux résisté que le mortier au ciment Portland ordinaire sans pouzzolane. C'est le mortier à 30% de pouzzolane qui a résisté le mieux : plus le taux de pouzzolane est grand plus la résistance à la solution acide est meilleure. Le suivi de pH des solutions acides et la prise des dimensions des éprouvettes après immersion dans les solutions acides ont confirmé cette tendance que tous les mortiers pouzzolaniques ont résisté à l'attaque chimique mieux que le mortier sans pouzzolane.



Figure 35. Etat des éprouvettes après 105 jours d'immersion dans 5% H_2SO_4 [68]

D'après les travaux de Benkaddour et al [30], ils ont constaté que la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle (à base de la vase calcinée de barrage Fergoug) améliorent la résistance à la compression à long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique.

- L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H_2SO_4 . Nous préconisons :

_ 20 % de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide chlorhydrique.

_ 30 % de pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide sulfurique.

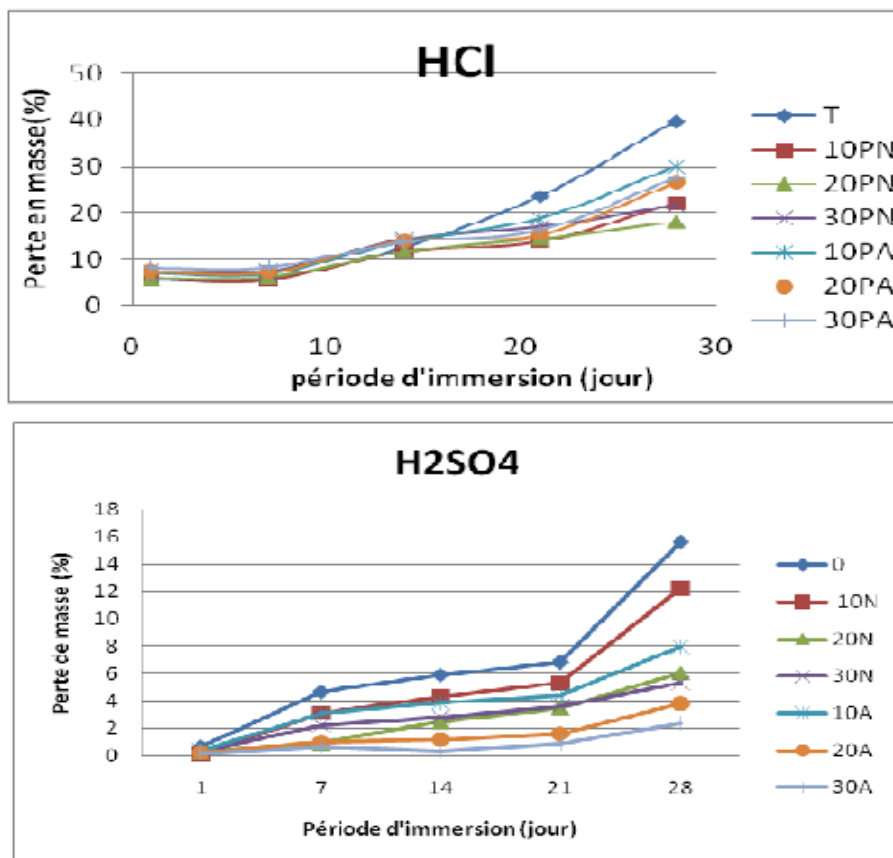


Figure 36. Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCl) et (5% H_2SO_4). [31]

Quand à l'agressivité du type d'acide, Belaribi [47] a étudié l'influence de plusieurs acides sur la durabilité des BAP élaborés de matériaux locaux, il a pu conclure que : Le béton autoplaçant étudié est très fluide avec absence de ressuage et de ségrégation, il renferme un pourcentage important de fines qui lui procure un meilleur arrangement granulaire.

Les rapports E/C = 0,515, F/C = 19.7 et Vpâte = 37.5% ont influé positivement sur la stabilité et la résistance à la ségrégation du BAP. Ces derniers ont permis d'obtenir un BAP répondant aux exigences de l'AFGC [25].

L'ajout d'environ 20% de fines calcaires, contribue à diminuer la viscosité du BAP (augmentation du diamètre d'étalement).

L'attaque des acides inorganiques (acide chlorhydrique et acide sulfurique) est plus agressive que celle de l'acide organique (acide acétique), la dégradation est liée non seulement à la concentration des acides mais aussi à leurs solubilités.

Si le milieu du BAP est fortement agressif avec une source de renouvellement de l'acide chlorhydrique, l'attaque serait très nuisible.

Plus la concentration des acides est faible moins les solutions sont agressives.

A même concentration le BAP immergé dans l'acide acétique développe une meilleure résistance par rapport aux autres BAP.

Dans la suite de ces travaux [84] il a étudié l'effet de la substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle et de vase issu des barrages de Chorfa, de Fergoug sur la durabilité des BAP à différents pourcentages, Les principales conclusions que nous pouvons tirer, sont les suivantes :

L'incorporation de la vase calcinée dans les BAP améliore la résistivité de ces bétons envers l'attaque de l'acide sulfurique. Le BAP VC et le BAP VF présente des performances très comparables à celles du BAP PZ et bien meilleures de celles du BAP T.

L'examen visuel a permis de mettre en évidence l'état de chaque béton avant et après attaque H_2SO_4 et HCl. Les photos ont montré le faible taux de perte en forme des échantillons de BAP VC, BAP VF et de BAP PZ, par contre elles ont montré, la disparition de la moitié (voire plus) des échantillons de BAP T.



Figure 37. Dégradation des échantillons du béton après 6 semaines d'immersion dans la solution d'acide sulfurique H_2SO_4 et d'acide chlorhydrique Hcl.[47]

2. 2. Actions des sulfates

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition, environnements chimiquement agressifs [85].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer d'avantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

2. 2. 1 Source des sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions (comme l'Afrique du nord, les prairies canadiennes, ..) où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut en rencontrer des concentrations élevées supérieures à 5%.

En région parisienne ces concentrations sont d'environ : 58g/l pour le Na_2SO_4 , 194g/l pour le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 440g/l pour $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et de 2,1g/l pour le CaSO_4 .

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions $\text{SO}_4^{(-2)}$. Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

Les sources de sulfates peuvent aussi être internes:

- Contamination des granulats par du plâtre
- Granulats gypseux
- Sulfures dans certains granulats

2. 2. 2. Mécanisme d'attaque

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSOB4B} \cdot 2\text{HB2BO}$ et anhydrite CaSOB4B), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSOB4B} \cdot 2\text{HB2BO}$) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure.

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [84] :

→ **Formation du gypse secondaire** (formule I.9) :

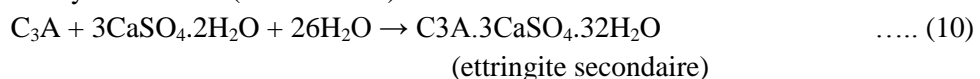


NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des CSH.

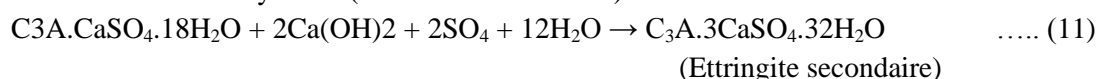
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'y a pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et le gel et la décalcification du C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment.

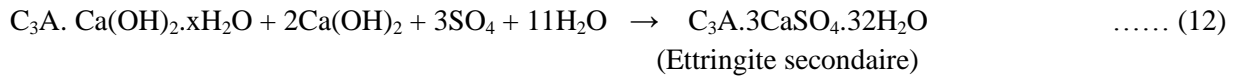
→ **Formation d'ettringite secondaire** : [86]

a) À partir du C_3A anhydre résiduel (formule I.10) :



b) À partir des aluminates hydratés (formules I. 11 et I. 12) :





La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (Ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures au volume du solide initial.

La figure I.39 schématise le mécanisme proposé par Santhanam et al cité par [84] dans le cas de l'attaque par les sulfates de sodium. L'étape 1 décrit l'état initial du processus. Dans le cas d'une solution à bas pH (6-8), le temps du déclenchement de l'expansion est réduit. Toutefois, le taux d'expansion après cette initiation (au cours de l'étape 2), n'est pas différent lorsque le pH est faible. Dans l'étape 2, le gypse et l'ettringite commencent à se former à la surface. Ainsi, comme il est décrit dans l'étape 3, une force de compression résultante est produite à la surface. Des fissures à l'intérieur du mortier sont provoquées (étape 4) avec un dépôt de produits au niveau des fissures et même dans la pâte. Le gypse se dépose dans les fissures et dans les vides parce que ceux-ci fournissent les meilleurs sites de nucléation. Il existe trois zones distinctes dans le mortier : zone de surface désintégrée, la zone de dépôt des produits d'attaque, et à l'intérieur la zone de fissures qui est chimiquement inchangée.

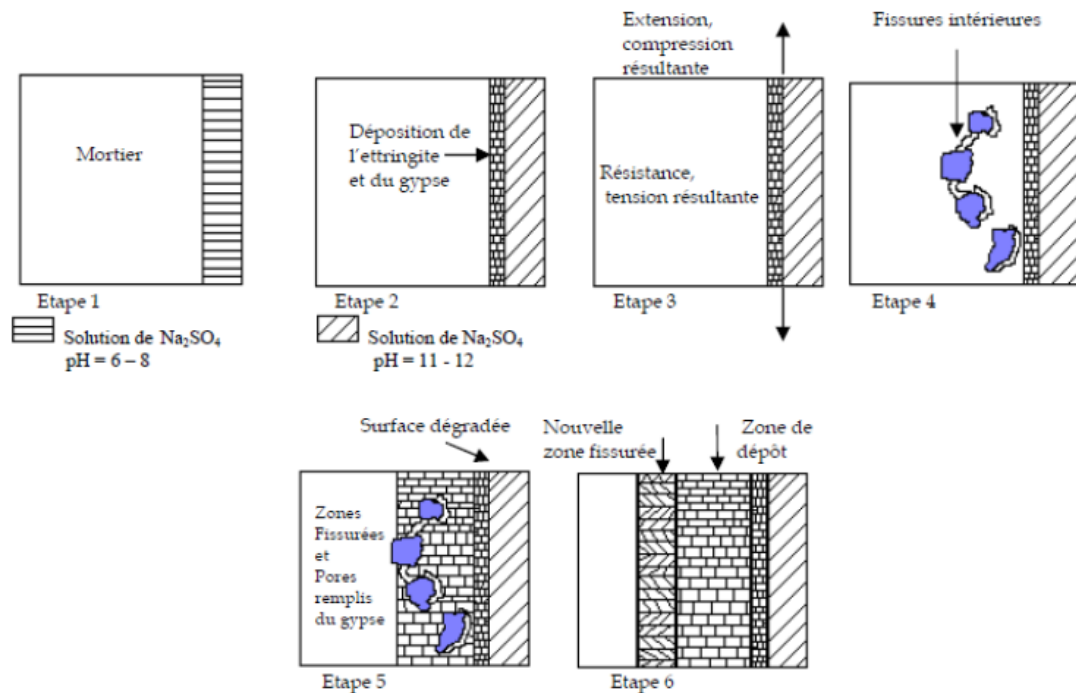
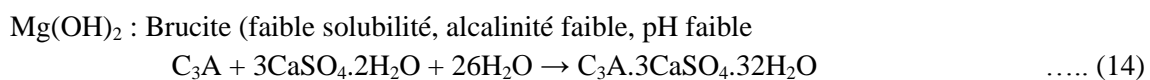
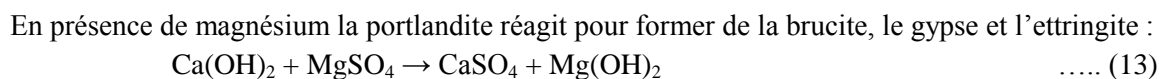


Figure 38. Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium cité par [84]

Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium [87].

Le sulfate de magnésium réagit par double action (formules 13,14 et 15):

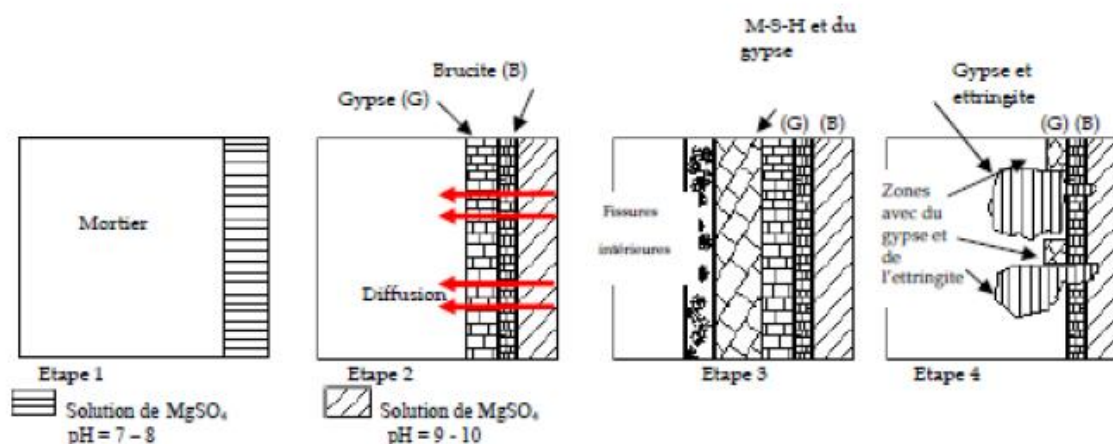


Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les CSH :



(C,Mg)-S-H : gel faiblement cohésif.

Le mécanisme proposé dans le cas de l'attaque par les sulfates de magnésium est schématisé dans la Figure I.40. Une couche de brucite (hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$) se forme rapidement sur la surface de l'échantillon en raison de la réaction de la portlandite $Ca(OH)_2$ avec la solution. La couche de brucite est souvent complétée par une couche de gypse qui se forme à la suite de la même réaction à l'intérieur de la couche de brucite d'où une augmentation du taux d'expansion. Une fois que les canaux d'écoulement sont établis à travers la surface de la couche de brucite, une attaque directe des CSH peut se produire. À la suite de cette attaque, la formation de MSH et de gypse secondaire aura lieu (étape 4). La détérioration finale du mortier est la conséquence de la perte de résistance du fait de la transformation de la pâte en MSH.



Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium ($MgSO_4$). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions SO_4 réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{2+} peuvent réagir avec les ions OH^- et former de la brucite ($Mg(OH)_2$) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les CSH. Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [48].

La nature de l'immersion et le type de ciment peuvent également affecter la résistance mécanique comme le montre les travaux de [88] ou il a traité les conséquences mécaniques de l'attaque sulfatique externe sur les bétons autoplaçants. Deux différents protocoles d'attaque sulfatique externe ont été appliqués pour quatre types de bétons autoplaçants à base d'agrégats concassés. Le premier protocole est l'immersion totale des échantillons dans une solution à 5% de $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ à $20^\circ C$ et le second l'exposition des éprouvettes des bétons à des cycles d'immersion/séchage à $60^\circ C$ pour accélérer l'altération. L'exposition des échantillons aux deux protocoles a abouti au classement des différents bétons testés vis-à-vis de la résistance à l'attaque sulfatique externe.

Il a constaté que :

Le premier est le protocole classique dans ce genre d'attaque et le second est un protocole d'accélération du vieillissement. Les deux protocoles ont généré un endommagement. Le béton le plus faible a été endommagé le premier et les bétons confectionnés avec le ciment CEMI n'ont pas été affectés.

Le protocole immersion – séchage à 60°C fonctionne effectivement comme un protocole d'accélération pour les bétons dont $E/C=0.59$, tandis que l'endommagement qu'il provoque dans les bétons dont $E/C=0.49$ est peu significatif. Une meilleure solution pourrait donc consister à réaliser un nombre de cycles d'immersion – séchage à 60°C restreint puis d'exposer les échantillons à une immersion complète.

2. 2. 3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatiques

Dans une étude de la résistance du béton autoplaçant à l'attaque par des sulfates [89], l'accroissement du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et l'augmentation du rapport Eau/Liant équivalent, a été constaté. En effet, quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc la pénétration des agents agressifs plus difficile [29] (Figure 40).

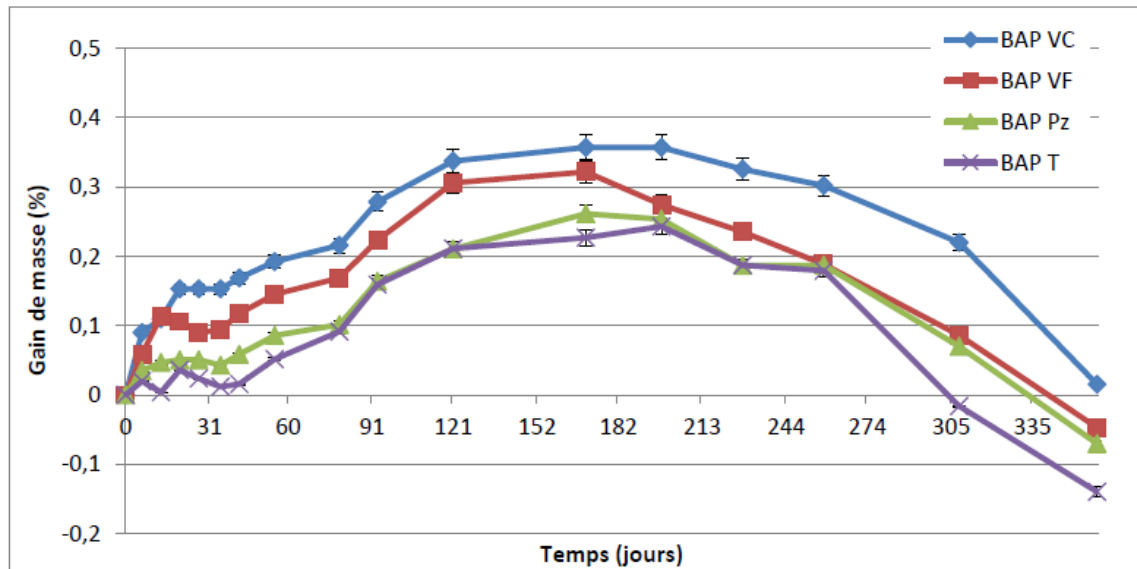


Figure 40. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% $MgSO_4$. [84].

Belaribi [84] a constaté que le BAP-Vase Calcinée présente les meilleures résistances au sulfate de magnésium par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution $MgSO_4$.

Les photos prises pour les bétons immergés dans la solution Na_2SO_4 n'ont pas permis d'enregistrer des signes extérieurs de dégradation des différents échantillons étudiés. Tandis qu'il a pu identifier des fissures autour des coins et des bords des éprouvettes de BAP-T. La présence de la vase dans la pâte des BAP réduit sensiblement le risque de carbonatation de ces bétons par rapport à celui des BAP à base de pouzzolane naturelle.

2. 3. Actions de l'eau de mer sur le béton

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- agressions mécaniques dues à l'action des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues,
- agressions chimiques dues à l'action, en particulier, des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer et dans certains cas, à la pollution des eaux,
- agressions climatiques dues aux variations de température,
- agressions biologiques de micro-organismes.

Les structures situées en site maritime sont exposées à plusieurs types de configurations. Elles peuvent être :

- continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer, même à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes,

- alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse). Les bétons situés dans les zones de marnage sont soumis 2 fois par jour à des imprégnations d'eau de mer alternant avec un essorage et donc à des cycles humidification-dessiccation et ce sont donc les plus agressés,

- soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues.

Ces zones de hauteur variable sont situées au dessus du niveau de l'eau à marée haute,

- continuellement émergées, donc sans contact direct avec le milieu marin, mais soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures. Les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ; pour les bétons de structure, la norme NF EN 206-1 étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte,

- soumises à l'air véhiculant du sel marin uniquement.



Figure 41. Etat des éléments en béton soumis à l'attaque par l'eau de mer [90]

La salinité des mers ou des océans peut être très variable, de quelques grammes par litre à plus de 200 g/l.

La salinité des grands océans est de l'ordre de 35 g/l.

Composition moyenne d'un litre d'eau de mer : [85]

NaCl	—————>	27, 20 g
MgCl ₂	—————>	3, 80 g
MgSO ₄	—————>	1, 65 g
CaSO ₄	—————>	1,25 g
Na ₂ SO ₄	—————>	0,85 g
soit au total	—————>	35 g

Le principal sel dissous dans l'eau de mer est le chlorure de sodium, puis viennent le chlorure de magnésium et les sulfates.

Chaid [7] a étudié l'effet de l'eau de mer sur les bétons à base de poudre de marbre, a conclu que les faibles rapports eau/liant conduisent à la diminuer la perméabilité du béton. Par ailleurs les ajouts de fins contribuent à l'amélioration de la compacité par leur effet sur le remplissage granulaire.

L'utilisation de la poudre de marbre contribue non seulement à réduire les émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) découlant de la fabrication du béton, mais également à améliorer la performance et la durabilité du béton dans la plupart des applications.

Du béton contenant de la poudre de marbre bien dosé et dont la cure a été adéquate devrait, en général, présenter une perméabilité moindre à long terme que le béton de ciment Portland correspondant (de composition semblable), et donc offrir une meilleure protection de l'armature contre la corrosion.

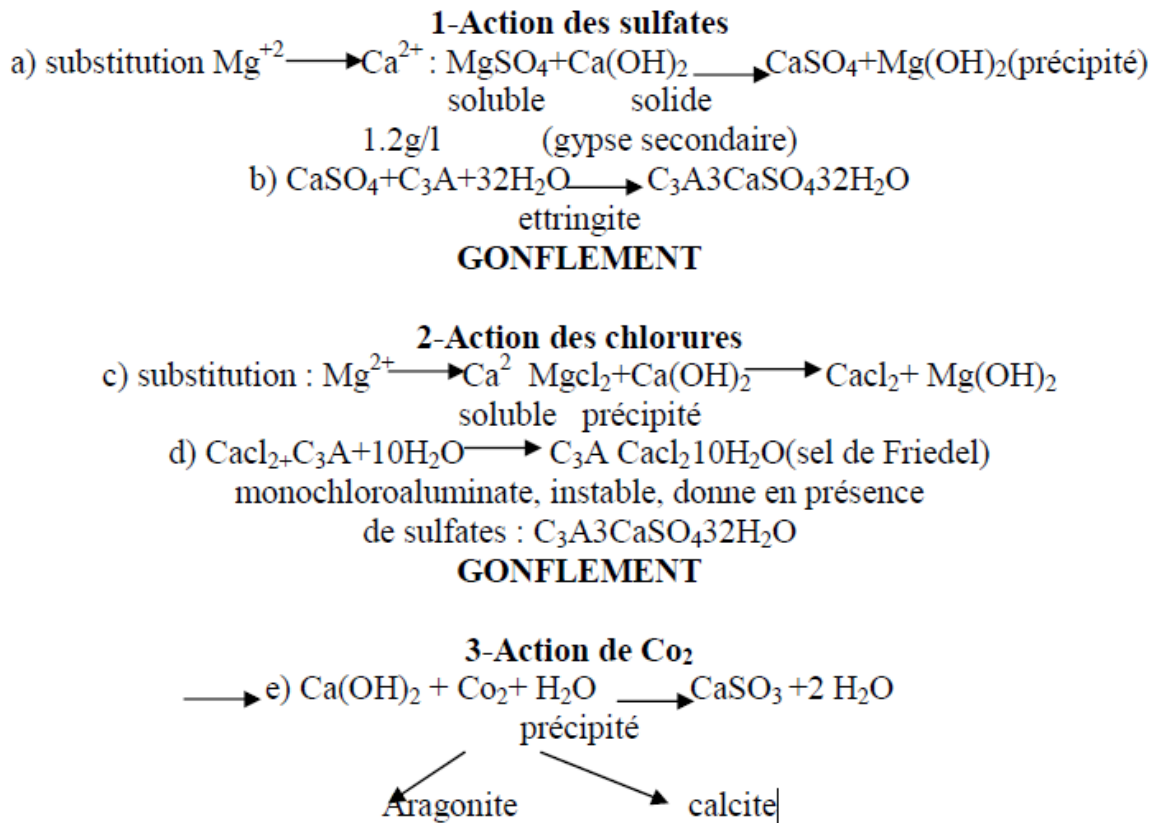


Figure. 42. Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone immergée) [91].

3. la poudre de verre vis-à-vis des attaques chimiques

[92] en travaillant avec un ciment résistant aux sulfates a conclu que la résistance à la compression pour les échantillons avec un remplacement de 10% du verre, immergés dans une solution de NaOH était inférieur à ceux immergés dans la solution de NaCl mais les deux étaient inférieurs à ceux immergés dans l'eau.

Les mortiers de poudre de verre comparés aux mélanges témoins sans ajout avaient un bon comportement en compression lors du durcissement par exposition externe à la solution $MgSO_4$, avec utilisation de 10 % de poudre de verre. Cependant la résistance à la compression du mortier de PV a été légèrement réduite lorsque la concentration en solution de $MgSO_4$ a augmenté de 5 % à 20 % d'après [93].

Une étude détaillée des mortiers incorporant de poudre de verre en s'associant à d'autres fines a été menée par [94] en les soumettant à une attaque d'acide sulfurique H_2SO_4 , la résistance à la compression était cohérente avec la perte de masse, ainsi pour l'ajout de 40% de poudre de verre qui était nettement supérieur au témoin en résistance et une différence de perte de masse de 15%. L'analyse microstructurale de [94] a montré que la dégradation des échantillons témoin, ont été causés principalement par les CH et décalcification C-S-H. C-S-H dense généré par réaction pozzolanique, associée à un rapport élevé a été détecté dans les mortiers à base de poudre de verre.

L'attaque par nitrate d'ammonium NH_4NO_3 a fait l'objet des travaux de Almeshal [95], il a confirmé la résistance du mortier avec remplacement partiel de 10% du ciment par la poudre de verre meilleure que celle du témoin après immersion de 60 jours.

Quand à Zerroub [15] il a suivi la résistance de son BHP à base de 30 de Poudre de verre après 90 jours de conservation dans le milieu plus ou moins agressif (eau de mer), les caractéristiques des bétons avec poudre de verre, ne sont pas affectées par les dégradations, une perte de 2 à 3 MPa par rapport à ceux

conservés dans l'eau de mer, probablement à cause de la porosité très faible qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi à la sortie des cations.

Egalement il conclue que le béton à base de poudre de verre présentait une pénétrabilité des ions chlore très faible par rapport au béton de référence ; cela confirmait que la poudre de verre agit avantageusement sur la microstructure et la résistance chimique des bétons, chose confirmée déjà dans les travaux de Zidol [48] et Chekireb [54] affirmant la bonne performance de la poudre de verre à réduire la pénétrabilité de ces ions de chlorures causant principalement la corrosion des aciers.

L'ajout de la poudre de verre dans le béton diminue fortement la porosité du milieu, il a pour conséquence la déconnection des pores existant rendant ainsi le milieu plus étanche limitant ainsi le transfert des fluides dans le béton.

Synthèse d'état de l'art de la durabilité chimique

Les ajouts cimentaires classiques améliorent la résistance aux attaques par les sulfates, à la pénétration des chlorures et à l'initiation de la corrosion mais semblent relativement affecter négativement la résistance à la carbonatation des bétons. La résistance aux agents agressifs des bétons incorporant des ajouts dépend quelquefois du type et du taux d'incorporation des ajouts. En effet, le laitier semble être réputé plus efficace dans l'amélioration de la résistance aux sulfates que les cendres volantes dont l'efficacité est d'ailleurs fonction du taux d'incorporation et du type de cendre. Les cendres volantes classe F sont plus efficaces dans le contrôle de l'attaque par les sulfates que celles de classe C. Le contrôle de l'attaque par les sulfates par les ajouts est parfois attribué à la diminution de la teneur en élément le plus vulnérable notamment le C3A résultant de la substitution du ciment par les ajouts. La profondeur de carbonatation est généralement plus élevée dans les bétons avec ajouts minéraux due à la faible teneur en portlandite de la matrice dans laquelle ils sont incorporés, conséquence de leur réaction pouzzolanique.

L'effet de chaque ajout sur la résistance du béton aux agents agressifs extérieurs est étroitement lié aux facteurs impliqués dans les mécanismes d'attaques par l'agent agressif concerné. Globalement, les ajouts contribuent significativement à l'amélioration de la résistance du béton aux attaques extérieures en densifiant davantage la matrice cimentaire par leurs effets pouzzolaniques et/ou filler. Il est incontestable que c'est la densité et l'imperméabilité de la microstructure qui rendent les bétons à faible rapport E/L durables.

Les agents agressifs ou les gaz font face à une structure dense qu'ils ne peuvent pas pénétrer facilement. La pouzzolanité est une propriété particulière des ajouts qui leur confère une valeur ajoutée et l'intérêt principal de leur incorporation dans une matrice cimentaire. Ils agissent beaucoup plus sur les propriétés de transport du béton et corrélativement une amélioration de leur durabilité dans les milieux extérieurs potentiellement agressifs.

A travers les recherches menées sur la durabilité de différents bétons, nous avons constaté qu'il existe une relation entre le type d'addition et/ou le substitut (dans le cas des ciments composés) utilisé dans la pâte de ciment et les propriétés de résistance chimique (carbonatation, attaque sulfate et attaque acide) de ces matériaux cimentaires. Cependant, les additions minérales utilisées dans ses travaux ne permettent pas de tirer des conclusions pertinentes sur la durabilité des BHP et BAP. En effet, ce dernier qui possède un volume très élevé de pâte et d'addition minérale semble plus influencé par le type et la quantité des ajouts ou des substituts de ciment. Ce qui signifie clairement qu'un besoin en recherche est nécessaire dans l'étude de l'effet de la nature et des proportions de nouvelles additions minérales et substituts de ciment sur la durabilité des BHP.

Chapitre 4

Caractérisation des matériaux

Le premier chapitre porte sur la caractérisation des matériaux qui seront utilisés dans cette étude expérimentale et en particulier celle de la poudre de verre. (Caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques).

Introduction

Les objectifs de cette étude expérimentale visent à réaliser des bétons à hautes performances à base de déchets recyclés (poudre de verre) en caractérisant leurs propriétés physiques et mécaniques.

En effet, le travail que nous présentons met en évidence l'utilisation de la poudre de verre comme substitution partielle au ciment. Le comportement du BHP est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, des essais de caractérisation et d'identification des matériaux entrant dans les compositions des matériaux cimentaires étudiés (mortiers et bétons) sont détaillés dans ce chapitre.

1. Identification des matériaux

1. 1. Ciment

Les CPA sont les ciments portland noté également CEM I composé de clinker à 95 ou 100%, ils sont de teinte grise assez soutenu. Ces ciments sont employés dans les ouvrages de structure de Génie-civil (Ponts, grandes structures élancées) ou dans la préfabrication. Ils permettent une résistance au jeune âge qui permet un décoffrage rapide. Un seul type de ciment a été utilisé pour des différentes compositions : un ciment CEM I 52,5.

CEM I 52,5 (CPA) (95% clincker + 5% de gypse), produit par le groupe industriel des ciments de Sour El Ghouzlane (GICA) situé à la wilaya de Bouira (Algérie) et conforme à la norme NF EN 197-1 dont le clinker est produit et broyé conjointement avec le gypse par le groupe GICA.

Un arrêt de la production de l'usine a été maintenu pendant 10 minutes où la sortie des autres additifs était suspendue (utilisé habituellement pour la fabrication du ciment industriel commercial CPJ 42.5).

Le choix du ciment sans ajouts nous permettra d'un côté d'éviter l'interaction entre ses additifs et le substituant (poudre de verre) et d'un autre côté d'étudier seulement l'effet de la poudre de verre sur les performances des bétons à haute performances ainsi que leur durabilité [90].

Le détail de sa composition chimique et minéralogique est donné dans les tableaux 7 et 8, quand aux caractéristiques physiques et mécaniques ils sont résumés dans les tableaux 9 et 10.

Tableau 7. Compositions chimiques du CPA

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	PAF
Pourcentage (%) par masse	21.29	4.72	3.49	64.68	0.44	0.17	2.06	1.93

Tableau 8. Composition minéralogique du CPA

Constituants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	gypse
Pourcentage (%)	60.61	15.36	6.6	10.61	5

Tableau 9. Caractéristiques physiques du ciment CPA

Caractéristiques	Résultats
Consistance normale (%)	25.8
Début de prise	2 h 08 min
Fin de prise	5 h 13 min
Masse Volumique	3.47 kg/m ³
Surface Spécifique Blaine	2530 cm ² /g

Tableau 10. Caractéristiques mécaniques des ciments

Résistance (MPa)	Age (jours)			Norme
	7j	14j	28j	
Compression	45	50	56	NF EN 196 - 1

1. 2. Les granulats

❖ Le sable

Pour la confection de notre béton, on a utilisé le sable concassé, de roche naturelle calcaire de la région de Sidi Slimane d'un module de finesse ($M_f = 2,94$) corrigé avec celui de Boussaâda ($M_f = 0,82$). Un module de finesse élevé est préférable pour le sable utilisé en BHP en vue de réduire la quantité d'eau utilisée.

Le module de finesse prédéfini des sables à utiliser étant entre 2.2 et 2.8, une correction de sable grossier est faite ; on aura donc un mélange des deux sables contenant 93.4% de sable grossier et 6.6% de sable fin de Boussaâda, le module de finesse final après homogénéisation des deux sables vaut 2,6.

❖ Les Granulats

Le gravillon et le gravier sont des granulats concassés, de même nature minéralogique que le sable concassé. Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le Tableau 11. et leur courbe granulométrique par la norme NF EN932-2 est représentée sur la Figure 43.

Tableau 11. Caractéristiques physiques des granulats

Caractéristiques	Sable corrigé	Gravillon 3/8	Gravier 8/16
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.7	2,63	2,77
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.6	1,42	1,38
porosité	/	1,05	1,50
Absorption	/	0,42	0,13
Module de finesse	2.6	/	/
d/D	0/4	3/8	8/15

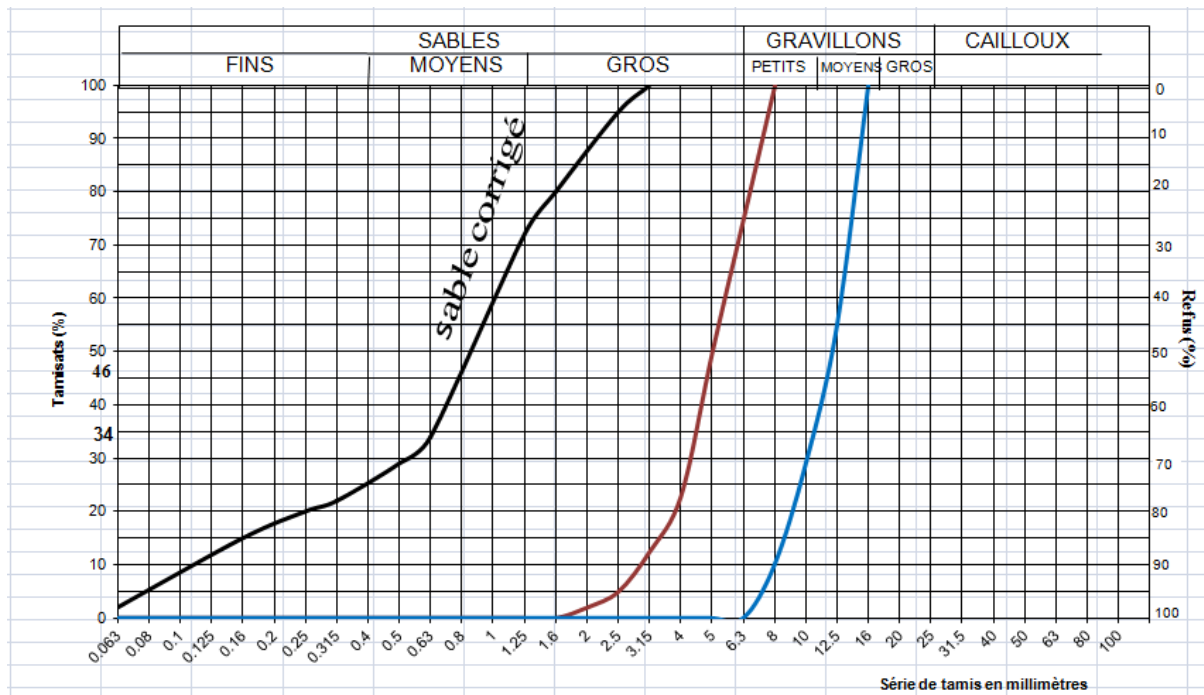


Figure 43. Analyse granulométrique par tamisage NF P18.560

1. 3. Adjuvant (Superplastifiant)

Le groupe SIKA nous a fourni un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent pour béton prêts à l'emploi de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique et de dénomination commerciale **Sika Viscocrete Tempo 12** conforme à la norme NF EN 934-2 (se rapporter à la fiche techniques du TEMPO 12 voir **Annexe A**)

Tableau 12. Caractéristiques techniques d'adjuvant (données fournisseur)

Caractéristiques	VISCOCRETE TEMPO 12
Forme	Liquide
Couleur	brun clair
PH	6 ± 1
Densité	1,06 ± 0,01
Teneur en chlore	< 0,1 %
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %

Remarque : Le point de saturation pour notre ciment CPA pour le rapport E/C= 0,35 est de 2% et pour le rapport E/C =0,5 est de 1,5% du poids du ciment

1. 4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents mélanges provient du réseau public de distribution d'eau potable de la wilaya de Bouira au niveau du laboratoire qualité et production de la cimenterie de Sour El Ghouzlane (GICA) et du laboratoire matériaux du département du génie civil au niveau de l'université de Bouira.

2. La Poudre de verre (PV)

2. 1. Structure et composition

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme l'utilisa pour la première fois, il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes et des bijoux. Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie ou d'Égypte. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleurs verte ou bleue. Les fours permettent d'obtenir de plus hautes températures, pour lesquelles la matière est mieux travaillée. Aujourd'hui le verre est produit industriellement pour diverses applications. Il peut servir de contenant comme de bouteilles, pots de yaourt, bécards, éprouvettes, tubes d'essais, etc... La grande majorité du verre produit pour des applications de vitrage ou de conditionnement est de type sodocalcique. Les formulations typiques sont à base de silice, auxquelles sont ajoutés des éléments mineurs permettant d'aider à la mise en œuvre ou d'adapter les propriétés du produit fini.

Le verre peut être considéré comme un solide mais aussi comme un liquide surfondu. Il est issu du refroidissement rapide d'un liquide entraînant sa vitrification. D'un point de vue structurel, le verre est généralement comparé à un liquide car il présente une structure désordonnée, comme le montre la figure 44. (Zachariasen 1932 cité par [96]).

Ce réseau amorphe est basé sur un ou plusieurs éléments « formateurs de réseau », définis comme pouvant former un verre à eux seuls. Ce sont des éléments de valence élevée (4 ou 5) comme le silicium, le bore, le phosphore, formant des polyèdres, dont la structure est désordonnée à grande échelle. Dans le cas des verres sodocalciques, c'est le silicium qui forme le réseau.

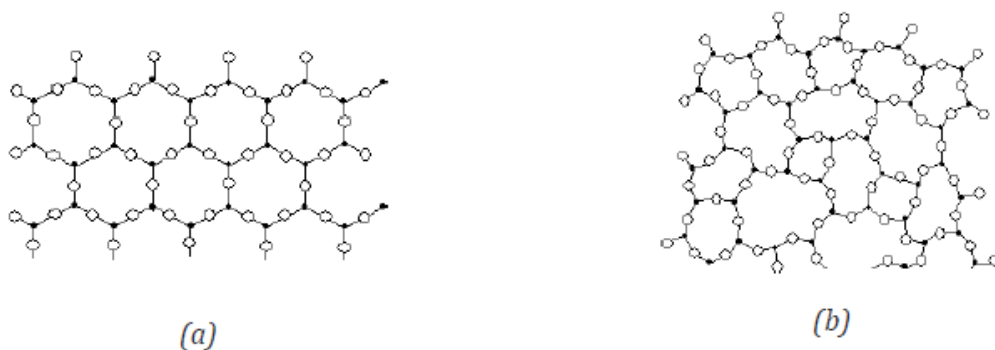


Figure 44. Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite) (b) structure vitreuse, réseau amorphe (Zachariasen 1932 cité par [96]).

Des « modificateurs de réseau » sont également ajoutés aux verres. Ces éléments alcalins ou alcalino-terreux, typiquement CaO et Na₂O, permettent soit d'équilibrer les charges, soit de modifier le réseau. Les alcalins (M₂O) sont appelés des « fondants ». Ils provoquent des coupures dans le réseau continu de silicium (voir Figure II.4), ce qui facilite la mise en œuvre grâce à une diminution de la viscosité et de la température de fusion. L'ajout d'alcalins affecte négativement la durabilité du produit. Des éléments « stabilisants » sont donc ajoutés dans la matrice afin d'améliorer la résistance du verre face aux attaques chimiques. Ces éléments sont des alcalino-terreux (CaO, MgO), qui modifient le réseau en formant des ponts entre les polyèdres (voir Figure II. 3). L'ajout d'alumine (Al₂O₃) en faible quantité permet également d'améliorer la durabilité du verre.

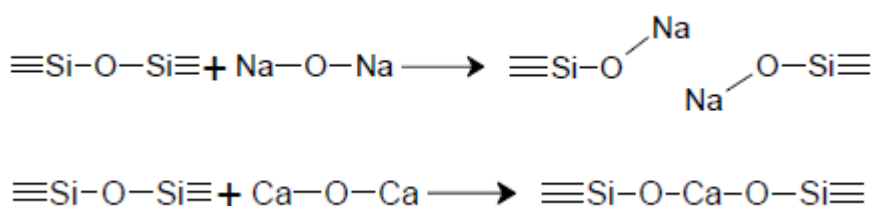


Figure 45. Les éléments fondants et stabilisants

Enfin, on retrouve divers oxydes métalliques à l'état de trace, comme le fer, le titane, le cobalt ou le chrome. Ce sont soit des impuretés, soit des ajouts permettant d'adapter la couleur du produit fini. Le fer est toujours présent, et il est responsable de la teinte légèrement verte du verre transparent. À plus forte concentration le fer permet de donner la couleur brune au verre. Le chrome est ajouté pour obtenir la couleur verte et le cobalt permet d'obtenir un verre bleu. Les formulations typiques de verre creux, utilisées notamment pour la fabrication de bouteilles, sont présentées dans le tableau 13.

Tableau 13. Composition typique des verres creux [62, 3, 27]

élément	Min	max	typique
SiO ₂	68,9	75	74
CaO	4,9	13	10,5
Al ₂ O ₃	1,2	3,0	1,3
Fe ₂ O ₃	0,1	0,9	0,4
P ₂ O ₅	-	-	-
MgO	0,3	1,1	0,5
SO ₃	0,07	0,21	0,2
Na ₂ O	10	16	13
K ₂ O	0,2	0,7	0,2

Les bouteilles de verre peuvent être recyclées, cependant, le recyclage du verre mixte est confronté à des difficultés de tri, menant assez souvent à sa mise en décharge. Une autre nouvelle technique innovante permettant d'exploiter ces verres mis en décharge est leur utilisation dans le béton, l'utilisation de la poudre de verre dans un système cimentaire, est un moyen de valorisation des verres en décharge. C'est une technique récente et les quelques résultats des travaux antérieurs effectués sur le verre, utilisé en poudre comme substitut partiel du ciment sont décrit ci dessous.

2. 2. La poudre de verre dans les bétons

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche ou grisâtre, elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe SiO₂ lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [83, 27, 62, 64, 47, 48]. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

La poudre de verre est un matériau essentiellement siliceux avec plus 70% de SiO₂ qui est finement divisé. Elle ne possède pas des propriétés hydrauliques, mais elle contient des constituants (silice, alumine) capables à température ordinaire de fixer l'hydroxyde de calcium pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. Alors, la chaux libérée par l'hydratation des phases silicatées du béton réagit avec le verre pour donner un silicate de calcium hydraté (C-S-H) semblable à celui formé lors de l'hydratation des deux phases silicatées du ciment portland.

La réaction pouzzolanique est présentée dans l'équation 16 :



2. 3. Propriétés à l'état frais

L'effet de la poudre de verre (PV) sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs, notamment, de sa finesse de mouture. Zidol [47] a étudié l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un BAP ayant un rapport E/C = 0,4, l'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la viscosité plastique de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en superplastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de SP requis pour un étalement donné. Cependant, pour les besoins rhéologiques des BAP, une finesse supérieure à celle du ciment peut être appréciable, notamment pour le maintien de la stabilité. L'utilisation d'un agent de viscosité peut être négligée si la matrice contient un plus grand nombre de particules pour un volume donné.

2. 4. Propriétés à l'état durci

- Propriétés mécaniques

Il est démontré que la poudre de verre a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes [72]. De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps. Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de PV en remplacement partiel du ciment [64, 48].

Tout comme les cendres volantes, la PV n'a pas d'influence sur les résistances à jeune âge. Les résistances à la compression à 28 jours sont plus faibles par rapport à un béton de ciment Portland. Au-delà de 56 jours et jusqu'à 91 jours les résistances des bétons avec PV sont équivalentes, voire supérieures au béton témoin. En outre, le développement des résistances à la compression augmente avec la teneur en PV entre 28 et 91 jours [47]. En effet, des bétons à hautes performances ont été formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m³ et un rapport E/L de 0,40. L'incorporation de 20 % et 30 % de PV confèrent au béton un taux de développement des résistances à la compression respectivement de 12 % et 18 %, alors que pour béton témoin, ce même taux est de 9 %.

Par ailleurs, la PV peut être incorporé avec la fumée de silice pour produire des bétons à matrice ternaire comme [47] en comparant les performances à l'état durci de quatre bétons ordinaires ayant un rapport E/L de 0,45. Trois d'entre eux contiennent différents ajouts cimentaires à savoir : ciment composé à base de 20 % PV + 5 % FS pour le premier mélange, TerC3 (20 % CV + 5 % FS) pour le second mélange et Tercem 3000 (22 % L + 5 % FS) pour le troisième mélange. Le quatrième mélange est formulé avec 100 % GU en guise de témoin. Ces résultats (*Figure 46.*) montrent que le béton ternaire à base de CV et le béton ternaire à base de PV ont des résistances à la compression similaires à tous les âges. Le béton ternaire avec L est comparable au témoin. Ce dernier résultat reste néanmoins particulier vu que le laitier est connu pour conférer au béton des résistances supérieures au témoin.

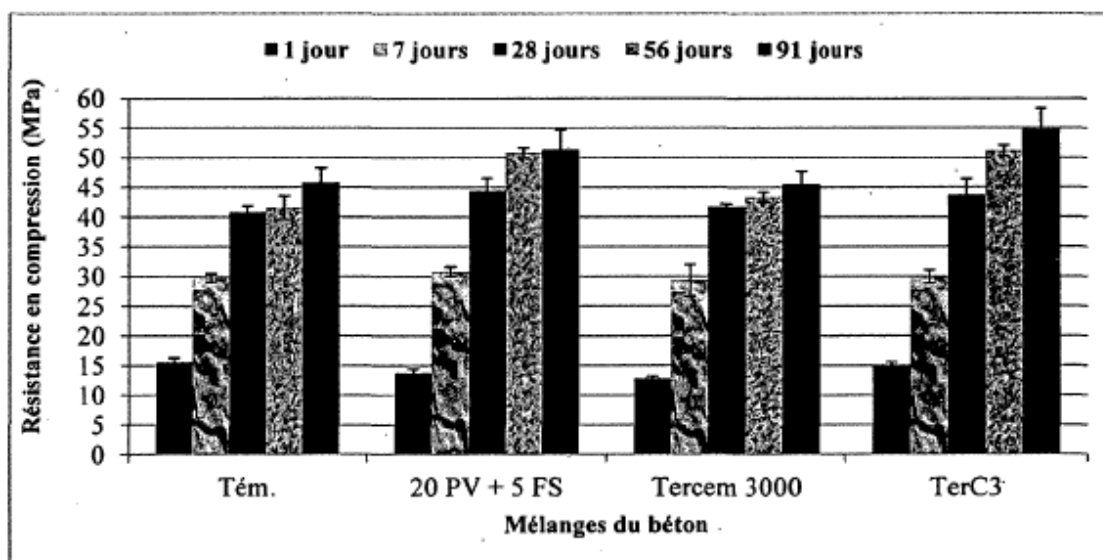


Figure 46. La résistance en compression pour les bétons ternaires [83]

❖ Durabilité

- Réaction alcali-silice et pozzolanique :

La réaction alcali-silice (RAS) désigne la réaction chimique qui se produit entre les minéraux silicatés de certains granulats et les alcalis contenus dans la solution interstitielle du béton. Un gel expansif se produit et augmente de volume avec l'absorption de l'eau. Ce qui génère des désordres dans les bétons : fissuration, expansion et baisse des performances mécaniques.

L'incorporation du verre finement broyé aide à limiter les dégâts causés par l'alcali réaction de par ces propriétés pozzolaniques. [3] a étudié l'action des fines et des granulats de verre sur la réaction pozzolanique et la réaction alcali-silice. Il se trouve que plus la finesse du verre augmente plus la chaux est consommée. Ce qui résulte en une grande production de gel C-S-H contribuant ainsi à la densification de la matrice cimentaire et à la réduction de sa perméabilité. Néanmoins, il faut faire attention quant à l'utilisation des fines de verre pour lutter contre la RAS. En effet, ces fines peuvent apporter à la solution interstitielle une certaine quantité en alcalins entraînant le dépassement du seuil limite au-delà duquel les granulats peuvent réagir de manière néfaste.

De même, dans une étude antérieure [97] ont montré que l'utilisation des granulats de verre peut provoquer la réaction alcali-silice, alors que l'utilisation du verre sous forme de poudre contribue à contrer l'expansion des granulats (Figure 47.).

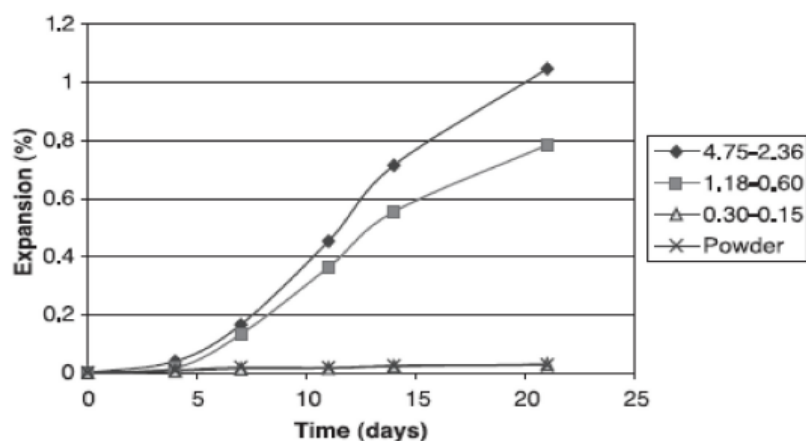


Figure 47. Expansion due to the RAS of mortars containing glass particles of different sizes [97]

Egalement La poudre de verre améliore la perméabilité du béton aux ions chlorures quel que soit le rapport E/L utilisé. La Figure II.6 illustre les résultats des travaux effectués par Zidol [48] sur des bétons incorporant 30 % de remplacement du ciment par les ajouts cimentaires et avec des rapports E/L variant de 0,65 ~ 0,35.

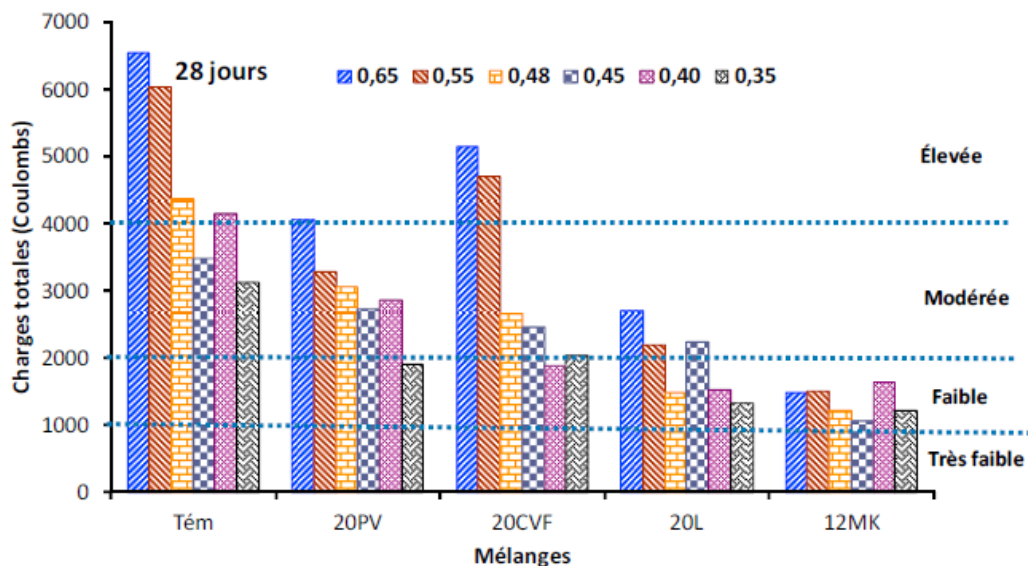


Figure 48. Pénétrabilité des ions chlorure à 28 jours des bétons incorporant la plupart 20% d'ajouts Cimentaires [48]

2. 5. La poudre de verre utilisée dans ce travail de recherche

Cette poudre est issue de la récupération des bouteilles en verre dans des décharges routières et dispersées dans la nature. La poudre de verre est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de couleur verte et blanche. Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier, séchées, concassées, finement broyées (Figure 49), et tamisées avec le tamis de 0.008mm, sa surface spécifique est de 3600 cm²/g (pour plus de détails se référer à l'Annexe B). La valorisation du verre de bouteilles dans les bétons pourrait constituer une alternative intéressante, sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. Cependant, sur le plan technique les verres de bouteilles contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granulats.

La composition chimique et les propriétés physiques sont représentées sur le tableau 14. Les caractéristiques granulométriques sont mesurées au granulomètre Laser du laboratoire Matériaux de l'unité de recherche au niveau de l'Université de Boumerdes sont reportées au niveau de la figure 50. Analyse granulométrique par laser étudie la distribution de la taille des particules présentes au sein d'échantillons secs de poudres, avec le principe de diffraction laser en utilisant le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser frappant une particule. Les particules passent à travers un rayon laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille. La lumière diffractée est recueillie par un détecteur multi-éléments ensuite l'image de diffraction obtenue est transformée en utilisant un modèle optique et une procédure mathématique appropriés. Enfin le résultat, illustré sous forme de courbe semi-logarithmique, est une distribution de particules en volume.



Figure 49. a Transformation des déchets de verre en poudre de verre

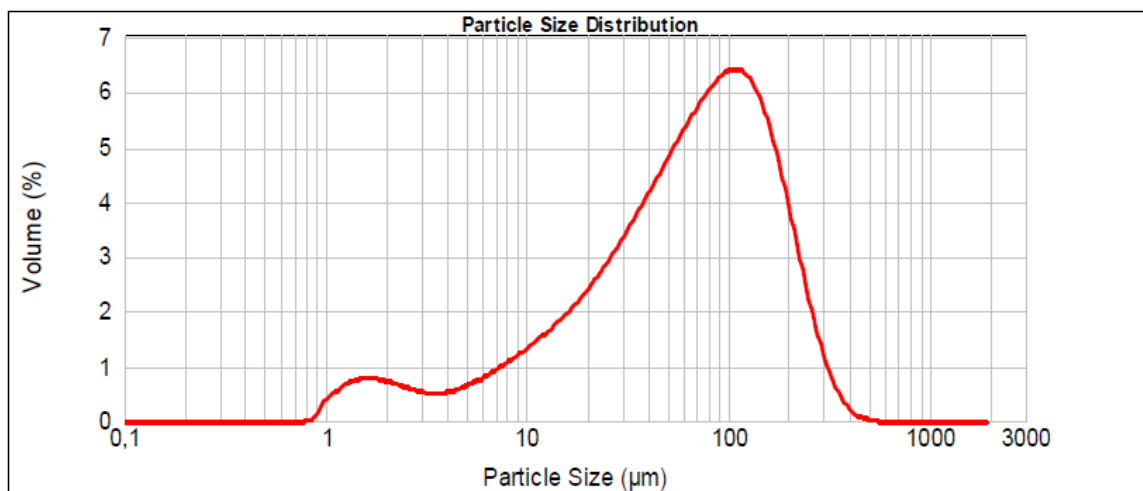


Figure 49. b Distribution granulométrique de la poudre de verre.

Tableau 14. Compositions chimiques de la poudre de verre

Oxydes (% par masse)	Poudre de Verre
SiO ₂	70.50
Al ₂ O ₃	1.42
Fe ₂ O ₃	0.10
CaO	8.43
MgO	4.01
Na ₂ O	15.28
SO ₃	0.25
Perte au feu	0.22
Densité (kg/m ³)	2120
Surface Blaine (cm ² /g)	3600

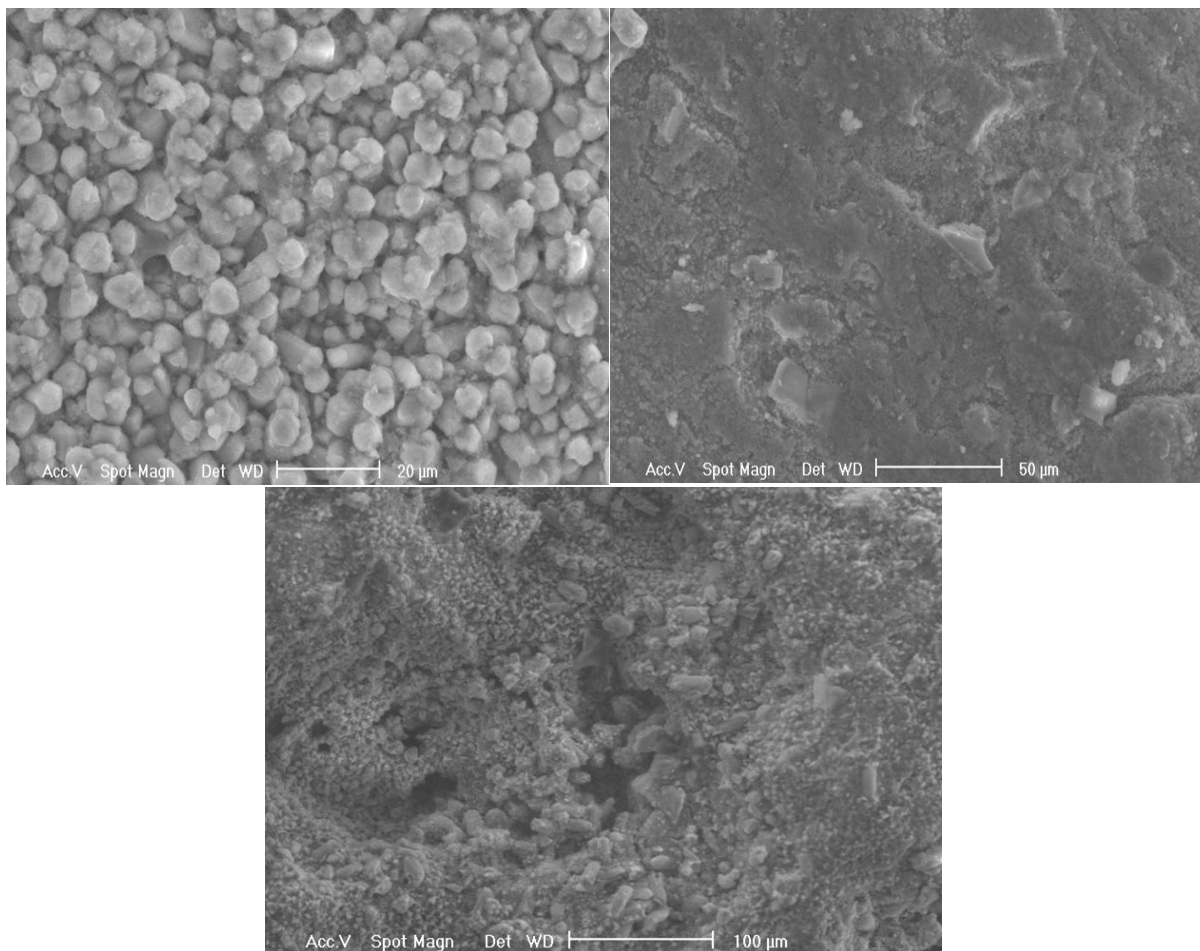


Figure 50. Image MEB de la poudre de verre

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition de notre travail, c'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces bétons à haute performance.

Chapitre 5

Procédures et techniques expérimentales

Dans ce chapitre, sont décrits les essais normalisés préconisés dans notre étude, ces essais sont relatifs à l'étude des propriétés des matériaux cimentaires (pâtes, mortiers, BHP et BAP) à base de poudre de verre ainsi que des formulations témoins pour le besoin de comparaison. Le début des investigations a été sur pâtes normalisées par des essais de mesure de la consistance et des temps de prise puis sur mortiers par des mesures de résistances à la flexion et compression, enfin sur BHP par des essais de caractérisation à l'état frais, durci et de durabilité. L'organigramme (Figure 51) détaille les étapes de l'étude élaborée.

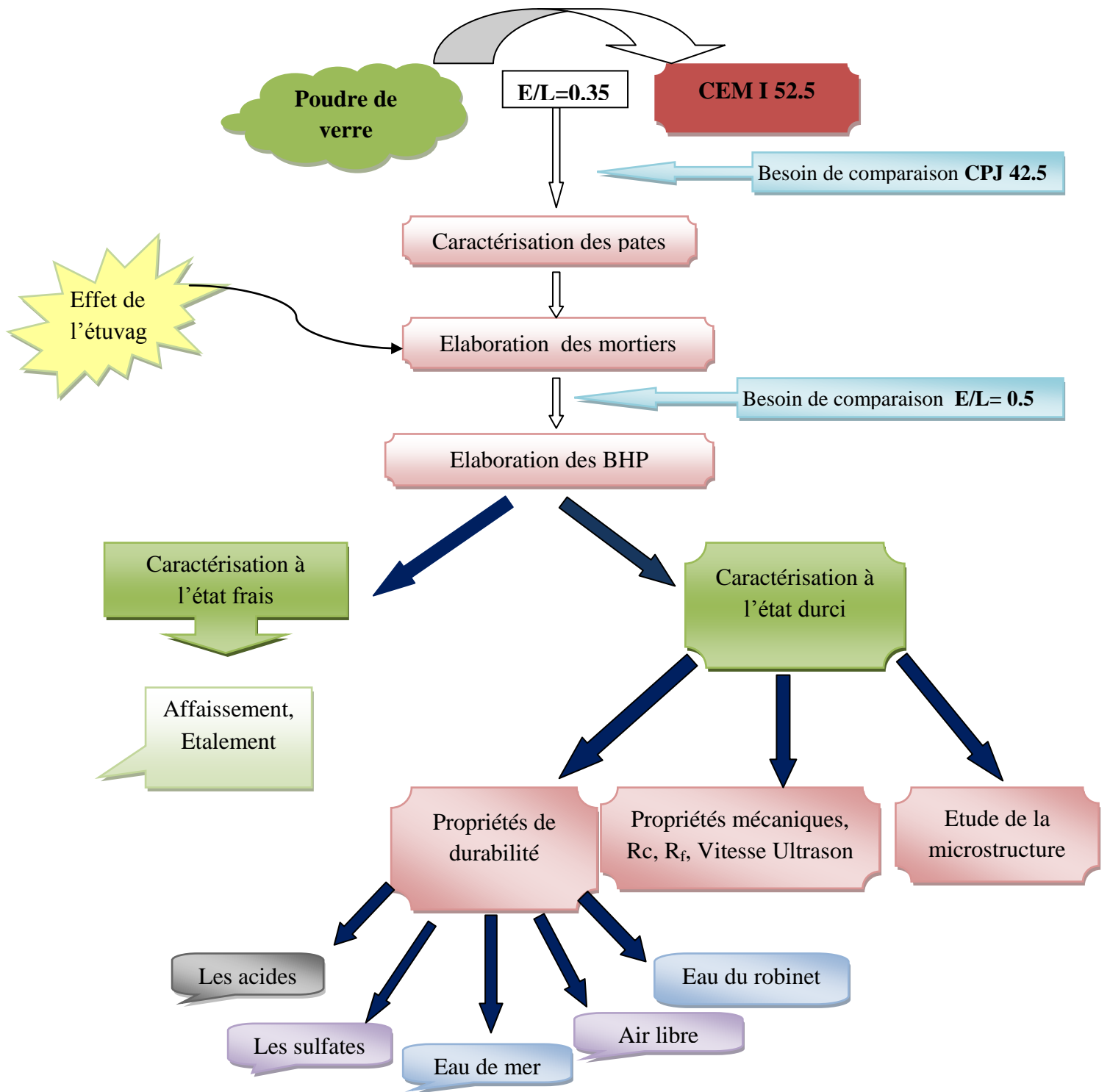


Figure 51. Organigramme détaillant les étapes de l'étude élaborée

1. Essais sur pâtes

1. 1. Essais de consistance

Pour chaque liant hydraulique, il y a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite « normale ». Cette consistance est déterminée selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde. L'appareil de Vicat est utilisé à la fois pour la détermination de la consistance normale ainsi qu'à la mesure du temps de début et fin de prise. La détermination de cette teneur en eau est nécessaire avant la mesure du temps de prise.



a- Consistance

b- Temps début et fin de prise

Figure 52. a et b : Appareil de Vicat automatique

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule, puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

La sonde est fixée sur la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse), la sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

La pâte sera à consistance normale si $d = 6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$:

- si $d > 7\text{ mm}$: il n'y a pas assez d'eau,
- si $d < 5\text{ mm}$: il y a trop d'eau.

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité, c'est une caractéristique qui évolue au cours du temps, pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

1. 2. Essais de prise

Il est nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : Le début et la fin de prise. On dispose une aiguille verticale coulissante de 1 mm^2 de section et pesant 300 grammes au-dessus d'un récipient, qui est le moule, contenant une pâte préparé, on appelle durée du début de prise le temps qui s'écoule entre l'instant du contact de l'eau avec le liant et celui où l'aiguille, descend normalement c'est-à-dire 4mm, pour les ciments courants, la coupelle de l'appareil de Vicat étant maintenue dans l'eau. L'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler). Le temps de début de prise est déterminé à

l'instant où l'aiguille de Vicat ($S= 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment normalisée.

1. 3. Essai d'étalement

La caractérisation du comportement à l'état frais des pâtes de ciment sans et avec poudre de verre effectué selon un essai empirique permettent d'examiner l'ouvrabilité des pâtes en mesurant l'étalement au mini-slump ou mini cône.



Figure 52.c Essai d'étalement.

Afin de s'assurer de l'uniformité des résultats, la température de tous les mélanges est maintenue à 22 ± 2 °C après le malaxage ; en considérant $t = 0$ minute le contact eau – liant, les essais sur les coulis sont réalisés après le malaxage, l'étalement au mini cône à $t = 5$ minute

2. Essais sur mortiers

2. 1 Formulation des mortiers

Nous utiliserons des mortiers normalisés, selon la norme NF P 15-403, la composition est la suivante :

- 450g de liant, les ajouts étant toujours introduits en substitution du ciment (0, 10, 20 et 30 % de poudre de verre par rapport au volume du ciment)
- 1350g de sable siliceux de granulométrie comprise entre 0.08 et 2 mm

Ceci correspond donc à un rapport sable/ciment égal à 3. Le taux d'eau de gâchage a été maintenu constant pour l'ensemble des gâchées : $E/L = 0.35$, car notre béton BHP va être confectionné avec le même rapport E/L.

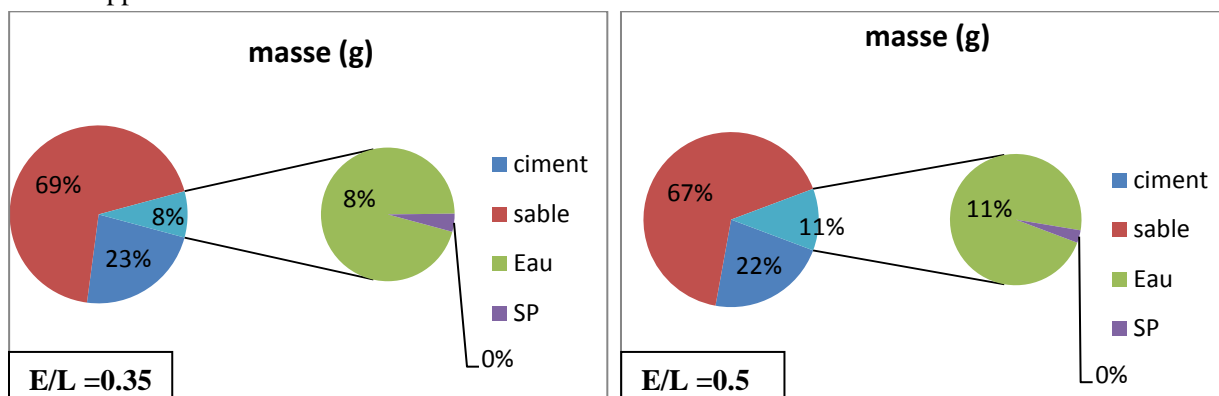


Figure 53. La composition massique des mortiers étudiés

Le mortier décrit précédemment est réalisé à l'aide d'un malaxeur au niveau de la cimenterie de Sour El Ghoulane (wilaya de Bouira), dans une cuve de cinq litres répandant aux caractéristiques de la norme NFP 15-411.

Cette cuve nous permet de réaliser la quantité de mortier nécessaire à l'élaboration des séries d'éprouvettes de 40 x 40 x 160 mm³ destinées pour les essais de flexion et compressions.

La procédure de malaxage est celle préconisée par la norme NFP 15-403 et elle est décrite en **ANNEXE C**.



Figure 54. Confection d'éprouvettes de mortier, appareil à choc et chambre de conservation.

Les éprouvettes sont conservées pendant 24 heures à 20 ± 2 ° C dans une chambre spéciale, recouvertes d'un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau. Elles sont ensuite démoulées et conservées pendant 28 jours ou plus (pour notre cas jusqu'à 365 jours) à 20 ± 2 ° C sous l'eau jusqu'à la date prévue des essais.

Les compositions massiques des différents mortiers étudiés sont résumées au niveau du Tableau 15

→ **Remarque** : Pour des besoins de comparaison on a formulé également un mortier ordinaire avec un rapport de E/L et E/C égale à 0.5 (tableau 15.) pour mieux comprendre le comportement de ces mortiers substitués de poudre de verre, également on a travaillé avec un ciment CEM II 42 .5 (CPJ) ou les caractéristiques de ce ciment sont résumés au niveau de l'**annexe D** pour faire une comparaison directe sur l'effet de la PV sur les autres minéraux autre que le clinker qui rentre dans la composition de ce CPJ lors de sa fabrication.

→ Abréviations

Durant notre étude nous avons comparé les résultats obtenus pour le mortier à base de poudre de verre avec le mortier de référence, les abréviations et leurs représentations sont données comme suit :

❖ Mortiers à hautes performances

- MHPR** : Mortier à haute performance de référence, E/L=0.35
- MHPL1** : Mortier à haute performance de référence, E/L=0.35, avec 10% de Poudre de Verre
- MHPL2** : Mortier à haute performance de référence, E/L=0.35, avec 20% de Poudre de Verre
- MHPL3** : Mortier à haute performance de référence, E/L=0.35, avec 30% de Poudre de Verre
- MHPC1** : Mortier à haute performance de référence, E/C=0.35, avec 10% de Poudre de Verre
- MHPC2** : Mortier à haute performance de référence, E/C=0.35, avec 20% de Poudre de Verre

❖ Mortiers ordinaires

- MOR** : Mortier ordinaire, E/L=0.5
- MOL1** : Mortier ordinaire, E/L=0.5, avec 10% de Poudre de Verre
- MOL2** : Mortier ordinaire, E/L=0.5, avec 20% de Poudre de Verre
- MOC1** : Mortier ordinaire, E/C=0.5, avec 10% de Poudre de Verre
- MOC2** : Mortier ordinaire, E/C=0.5, avec 20% de Poudre de Verre

Tableau 15. La composition massique des mortiers (en gramme)

% de PV	E/L=0.35				E/C=0.35		E/L=0.5			E/C=0.5	
	0%	10%	20%	30%	10%	20%	0%	10%	20%	10%	20%
Abréviation	MH PR	MH PL1	MH PL2	MH PL3	MH PC1	MH PC2	MO R	MO L1	MO L2	MO C1	MO C2
Ciment	450	405	360	315	405	360	450	405	360	405	360
Poudre de Verre	0	45	90	135	45	90	0	45	90	45	90
Sable	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Eau	157.5	157.5	157.5	157.5	141.7	126	225	225	225	202.5	180
Superplastifiant	9	9	9	9	8.1	7.2	6.75	6.75	6.75	6.07	5.4

2. 2. Essais mécaniques

❖ Essai de flexion trois points NF EN 196-1

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10mm de diamètre, distant de 100 mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge F.

Pour transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, le system apuis-eprouvette doit etre isostatique, c'est pour cela que l'un des deux appuis est fixe et l'autre est mobile.

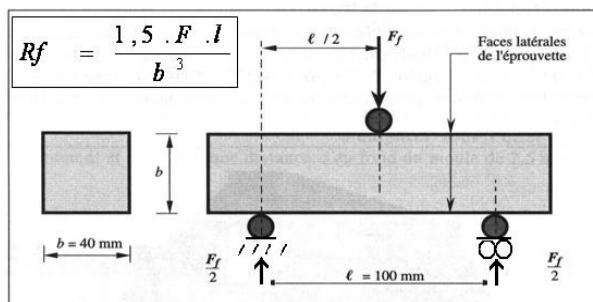


Figure 55. Essai mécanique de flexion sur mortiers

❖ L'essai de compression

Les demi-éprouvettes provenant de l'essai de flexion, vont subir l'essai de compression sur ses faces de moulage, sous une section de 40 × 40 mm, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10 mm d'épaisseur, de 40 ± 1 mm de largeur et de longueur et dont la tolérance de plénitude est de 0,01 mm.

Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm. (voir figure 56)

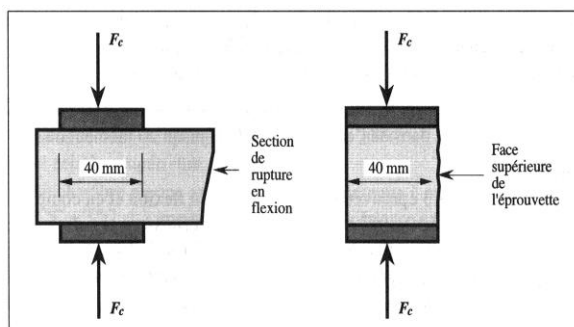


Figure 56. Essai mécanique de compression sur mortier

Selon la norme citée ci-dessus, 3 éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été utilisées à chaque essai de flexion. Les résultats donnés sont les valeurs moyennes obtenues. Chaque éprouvette de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ génère à l'essai de flexion deux cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ qui sont utilisés dans les essais de compression.

3. Essais sur le béton

3. 1. Mode opératoire et confection des éprouvettes du béton

La préparation du mélange a été faite en respectant soigneusement les démarches décrites en **Annexe C** (L'ensemble des granulats été lavés puis séchés), concernant la poudre de verre elle été mélangé préalablement avec le ciment pour mieux homogénéiser l'ensemble de notre liant avec les autres constituants qui dans notre cas $L = C + PV$ et aussi, respecter l'essentiel de notre travail de recherche qui est a rappeler la substitution du ciment par des quantités de poudre de verre dans les bétons à hautes performances.

Dimension des éprouvettes : principalement cylindre 160/320mm ou 110/220 mm, possibilité de cube 100 mm ou 150 mm.

Les moules d'éprouvettes choisis pour les essais de compression et de traction par fendage, sont des corps d'épreuve de forme cylindrique de dimensions normalisés ($\Phi = 11 \text{ cm}$, $h = 22 \text{ cm}$ et 16×32), voir figure II. 15. Pour les essais de flexion 3 points, les éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ sont confectionnées au laboratoire Matériaux de département de Génie Civil, Université de Bouira. Le béton est mis en œuvre et serré à refus en deux couches pour les cylindres 110/220. Les moules remplis sont par la suite posés sur une table vibrante (à faible amplitude) pour évacuer les bulles d'air et éviter les cavités dans le béton frais (augmente la compacité du béton).

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs et la dessiccation (vent, soleil) pendant un minimum de 16 heures et un maximum de 2 jours (pouvant être porté à 3 jours en cas de weekend ou de jour férié), à la température de $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Après 24 heures, les corps d'épreuves sont démoulés, conservés à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sous l'eau, après ils séjournent dans les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 20°C) jusqu'à la date prévu des essais.

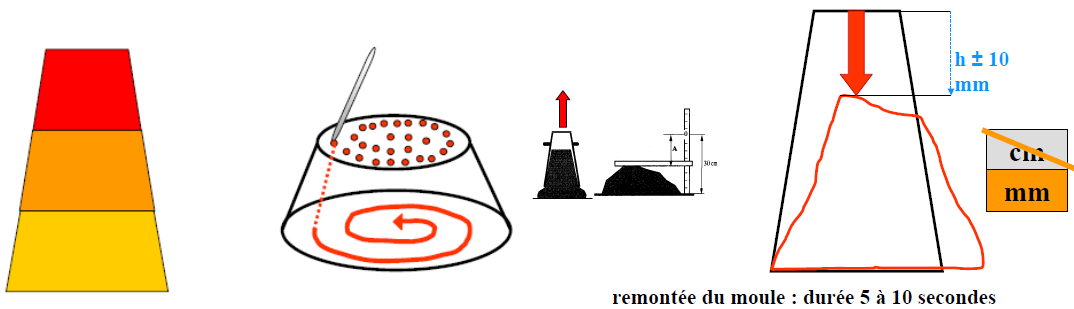


Figure 57. Confection et conservation des éprouvettes

3. 2. Caractérisation a l'état frais des BHP

→ La maniabilité (Essai d'Affaissement)

L'essai d'affaissement selon la norme NF P 18-451 et NF EN 12350-2 est utilise pour déterminer la consistance de nos gâchés de bétons conventionnels. L'affaissement est mesuré à 10 min après contact eau-liant, il est généralement utilisé pour des valeurs de 10 à 210 mm.



remontée du moule : durée 5 à 10 secondes

Figure 58. Recommandation de la norme NF EN 12350-2 pour Affaissement au cône d'Abrams - piquage : 25 coups par couche en 3 couches

Equipement d'essai :

- Moule stable en forme de tronc de cône de 300 mm de haut, avec diamètre inférieur à 200 mm et diamètre supérieur de 100 mm
- Main écope carrée ou ronde
- Tige de piquage métallique de 600 mm de long et 16 mm de diamètre, arrondie aux extrémités
- Surface de base rigide, plate et non absorbante (par ex. une tôle).

Exécution :

- Le cône humidifié est placé verticalement sur une surface solide, plane et non absorbante.
- L'essai complet doit être exécuté sans interruption en moins de deux minutes et demie
- On le remplit en trois couches de même volume approximativement et pilonnée à 25 coups chacune.
- Après le pilonnage et l'arasement de la dernière couche, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse, figure 59. Le cône vide est placé à proximité du béton pour mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près.

L'affaissement est la différence entre la hauteur du cône et celle de l'échantillon affaissé, à partir du centre de la surface supérieure du béton, mesure à 10 mm près.



Figure 59. Essai d'affaissement au cône d'Abrams réalisé au

→ Masse volumique

La masse volumique de tous les bétons est mesurée selon la méthode d'essai de la norme NF EN 12350-6 pour masse volumique sur béton frais et la norme NF EN 12390-7 pour masse volumique sur béton durci par la formule suivante :

$$\rho = (m_2 - m_1) / V \quad \dots\dots (17)$$

m₂ : la masse du béton + moule.

m₁ : la masse du moule.

V : le volume de l'éprouvette.

4. Les essais mécaniques

4. 1. Essais de compression

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire Matériaux sur une presse hydraulique pilotée par un micro-ordinateur. Sa capacité maximale est de 3000 KN. Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions des corps d'épreuves (éprouvettes cylindriques ou cubiques). Les valeurs de la force et de la contrainte sont lues directement sur l'écran de la machine en fonction du temps.

❖ But et principe de l'essai

Le résultat que l'on cherche à obtenir avec cet essai est la détermination de la résistance à la compression f_c (rapport entre la force appliquée/la section de l'éprouvette) du béton.

Les éprouvettes confectionnées sont donc ajustées entre les deux plateaux de la presse. Le plateau supérieur étant fixe, le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette est mobile. En remontant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau supérieur. Un extensomètre, placé sur la face latérale de l'éprouvette permet de mesurer les valeurs de la déformation. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante (soit 0,5MPa/s). Pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante sont enregistrées, et ce jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette qui se traduit par l'arrêt de la presse.

L'essai de compression est ainsi achevé. La charge maximale P est donnée dès que la rupture est enclenchée. Cette charge maximale servira à déterminer la résistance f_c , qui s'obtient comme étant le rapport de cette charge sur la section S de l'éprouvette, soit le rapport P/S . En exploitant tous les résultats obtenus, la courbe contrainte-déformation est ainsi tracée et ce, pour chaque pourcentage de poudre de verre.



Figure 60. Essai de compression avec logiciel de commande

4. 2. Essai de flexion trois points

Cet essai effectuée selon la norme NF EN 12390-5 un prisme de 70 x 70 x 280 mm de béton non armé, (Figure 61), est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge en un point centrale. La contrainte théorique maximale (capacité de résistance à la traction) de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspond au module de rupture.

Cet essai permet de contrôler la résistance d'un béton sous l'action d'un moment de flexion. Il consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique de section (b x h) et de portée (L) à une charge concentrée appliquée au milieu (P).

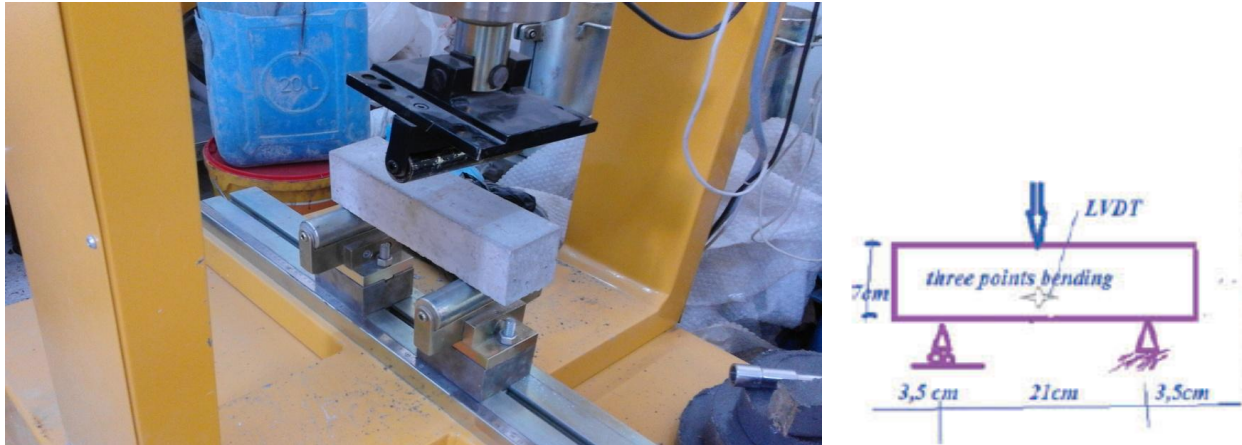


Figure 61. Essai de flexion 3 point sur prisme de béton

La contrainte limite du béton se déduit par application de la formule suivante:

$$F = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad \dots\dots (18)$$

Avec P la charge maximale, l la portée libre entre appuis, b la largeur et h la hauteur du prisme (dans notre cas b= h)

4. 3. Essai non destructif par Ultrason

Connu depuis longtemps cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton qui traduit la densité et l'élasticité de ce dernier.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue.

Les principales caractéristiques de tous les appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. (Figure 62). La longueur du trajet entre les transducteurs divisé par le temps de déplacement donne la vitesse moyenne de propagation des ondes.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables, la fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les normes ASTM C 97-83 (ré approuvée en 1991) et BS 1881 : partie 203 :1986 décrivent la méthode d'essai.

Les essais consistent à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures: selon Feidman [98]

- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.
- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

La vitesse de propagation des ondes dans le béton est liée essentiellement à la masse volumique et le coefficient dynamique du béton comme l'indique l'équation suivante dans les normes en vigueur ;

$$V^2 = \frac{E_d \cdot (1-\nu)}{\rho(1+\nu) \cdot \nu} \quad \dots\dots (19)$$

Où :

E_d est le module d'élasticité dynamique du béton

ρ est la masse volumique du béton

ν est le coefficient de poisson qui n'est généralement pas connu par exactitude, cependant il est souvent compris entre 0.15 et 0.28 selon le manuel appartenant à l'ultrason utilisé.

Beaucoup d'interprétations des résultats de mesures aux ultrasons sont données dans la littérature. Par exemple Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré comme homogène, isotrope et élastique et les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. Ces résistances ne sont utilisées par l'ingénieur que pour donner un avis qualitatif du béton in situ. Selon le chercheur Whitehurst (1951) [99]:

- $V < 2000$ m/s : béton de très faible résistance,
- 2000 m/s $\leq V < 3000$ m/s : béton de faible résistance,
- 3000 m/s $\leq V < 3500$ m/s : béton de moyenne résistance,
- 3500 m/s $\leq V < 4500$ m/s : béton à bonne résistance,
- $V \geq 4500$ m/s : béton à excellente résistance.

Pour évaluer la relation entre les vitesses ultrason V_U et le % de substitution ou d'ajout de la poudre de verre, nous avons testé les éprouvettes à différents âges.

Les éprouvettes étaient laissées pour sécher pendant 24h puis pesées, elles étaient ensuite testées à l'ultrason. Pour la mesure de la V_U nous avons utilisé l'appareil TICO d'une fréquence de vibration de 70 KHz, la V_U a été obtenu par transmission directe (Figure 63) selon la norme EN 12504-4. Trois mesures sont prises au centre des surfaces latérales de chaque cylindre, dans une direction perpendiculaire à la surface de béton comme montré sur la Figure II. 20. Pour assurer un couplage acoustique entre les transducteurs et la surface à tester une fine couche de couplant est appliquée sur le transducteur et sur la surface.



Figure 62. Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique.

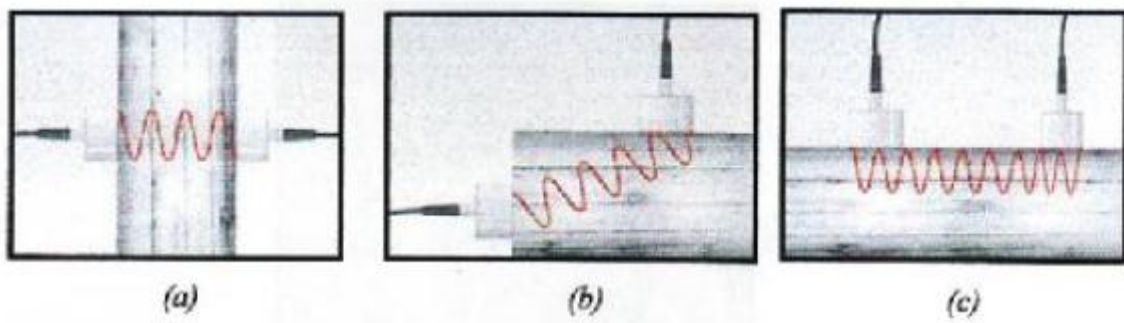


Figure 63. Les types de propagation d'ondes (**a**: directe, **b**:semi-directe, **c**: indirecte)

5. Analyse microstructurale par MEB

Le microscope électronique à balayage (MEB en français SEM en anglais pour Scanning Électron Microscope) est un instrument scientifique permettant de réaliser des images de la surface d'objet en 3 dimensions avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre (milliardième de mètre). La résolution d'un instrument de grossissement est défini par la taille minimale détectable par l'œil humain sur l'image produite par cet instrument. Ceci signifie qu'une image produite par un MEB permet de différencier distinctement deux points séparés de moins d'un nanomètre.

Depuis les années 60, le MEB est un instrument commercialisé pour les instituts de recherche dans le monde qui ont besoin de « voir » à l'échelle nanométrique.

Le microscope électronique à balayage (MEB) a été imaginé pour la première fois en Allemagne, dans les années 1930, par Knoll et Von Ardenne et développé par Zworykin, Hillier et Snyder aux Etats-Unis (1940). Mais la microscopie électronique à balayage a connu son véritable essor entre 1948 et 1965, grâce aux progrès techniques de la télévision et des détecteurs d'électrons et grâce aux recherches d'Oatley et de ses condisciples à Cambridge. Cette nouvelle technologie a permis, du fait de sa profondeur de champ, l'observation du relief d'échantillons massifs.

- **Préparation des échantillons**

L'échantillon, placé dans la chambre du microscope, reçoit un flux d'électrons très important. Si les électrons ne sont pas écoulés, ils donnent lieu à des phénomènes de charge induisant des déplacements d'images ou des zébrures sur l'image dues à des décharges soudaines de la surface. Si la surface est conductrice, les charges électriques sont écoulées par l'intermédiaire du porte-objet. L'observation d'échantillons électriquement isolants se fait grâce à un dépôt préalable (évaporation, pulvérisation cathodique) d'une fine couche conductrice d'or ou de carbone transparente aux électrons. On distingue deux types d'échantillons :

-Un objet massif de petite taille peut être introduit dans la chambre du microscope, à condition bien sûr qu'il soit conducteur car il est inimaginable de métalliser une pièce de collection

-Un prélèvement effectué sans pollution, poli et nettoyé.

La qualité des images obtenues en microscopie électronique à balayage dépend grandement de la qualité de l'échantillon analysé. Idéalement, celui-ci doit être absolument propre, si possible plat et doit conduire l'électricité afin de pouvoir évacuer les électrons. Il doit également être de dimensions relativement modestes, de l'ordre de 1 à 2 Cm. Toutes ces conditions imposent donc un travail préalable de découpe et de polissage. Cependant cette couche métallique, du fait de son épaisseur, va empêcher la détection de détails très petits. On peut donc utiliser un faisceau d'électrons de plus basse énergie qui évitera de charger l'échantillon (et donc de perdre de la visibilité), la couche métallique ne sera alors plus nécessaire.

- **Principe du « MEB » :** Vous avez sans doute déjà vu de jolies images noir et blanc en trois dimensions prises à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Figure 64)

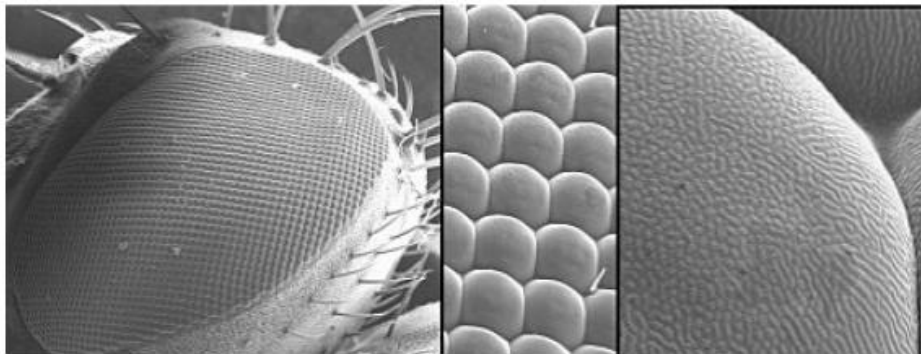


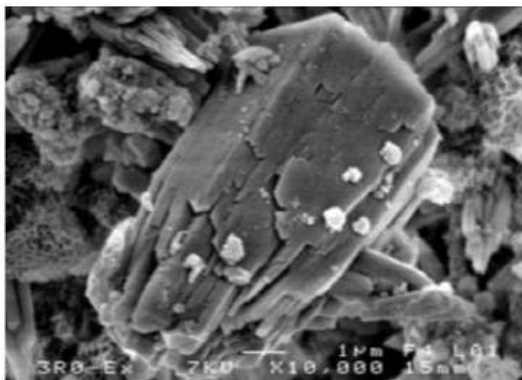
Figure 64. Un œil de mouche grossi 100, 1000 et 10 000 fois à l'aide d'un MEB

Le MEB n'utilise plus de la lumière comme vecteur pour « voir » mais un faisceau d'électrons comme son nom le laisse suggérer car la longueur d'onde des faisceaux d'électron est beaucoup plus petite que celle des photons. De plus, le rayon d'un faisceau d'électron peut avoisiner le nanomètre. Les MEB ont une résolution (capacité à distinguer des détails fins) qui se situe entre 0.4 et 20 nm (soit 500 fois plus que le meilleur microscope optique réalisé).

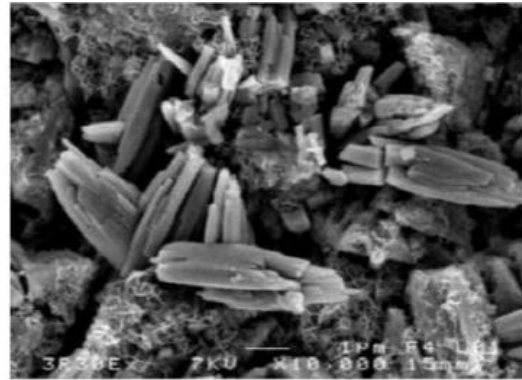
Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Les microscopes à balayage utilisent un faisceau très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon.

L'analyse microstructurale est effectuée sur mortiers et béton durci par le microscope électronique à balayage MEB (Figure 65).

Le MEB est utilisé pour étudier la microstructure et la constitution en phases de la surface fraîche et polie des échantillons ainsi que pour effectuer des analyses élémentaires qualitatives et semi-quantitatives de la surface par spectrométrie dispersive en énergie (EDS).



a



b

Figure 65. Observation au MEB de la surface externe des échantillons conservés dans l'eau du robinet.
a) Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre. [15]

6. Essais de durabilité

Un ouvrage en béton doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations physiques, mécaniques ou chimiques auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions conjuguées des éléments (le vent, la pluie, la neige, le froid, la chaleur, le milieu ambiant) tout en conservant son esthétisme. La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement. Elle dépend de nombreux paramètres tels que la qualité de sa conception, les matériaux utilisés, les dispositions constructives, la réalisation de l'ouvrage et les diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le moyen de défense du béton est étroitement lié à ses propriétés de transport. Les propriétés de transport sont essentielles lorsqu'il s'agit de considérer la durabilité des structures en béton, puisqu'elles favorisent la pénétration des agents extérieurs agressifs à l'intérieur du béton.

Les dégradations s'initient beaucoup plus vite à la suite de la pénétration des agents agressifs. Les principales propriétés de transport du béton sont la perméabilité et la diffusivité qui sont intimement influencées par les caractéristiques du réseau poreux notamment le volume de pores ou la porosité totale, la répartition des pores suivant leurs dimensions ou leur taille, leur connectivité et leur tortuosité. Ce chapitre s'intéresse aux différentes sortes de perméabilités ou de diffusions souvent impliquées dans les divers mécanismes de dégradation du béton qui sont abordés dans ce projet.

6. 1. Attaques acides (HCl)

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance mécanique et chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (5% en volume).

Des essais d'immersion dans des solutions d'acide chlorhydrique (HCl) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations des mortiers et BHP.

Les échantillons testés sont de forme cylindriques de 11cm de diamètre et de 22 cm de hauteur ont été confectionnées selon NF EN 196.1. Deux échantillons sont utilisés par formulation. L'essai a été réalisé après 28 jours conservation dans l'eau.

A l'échéance souhaitée, les cylindres ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de 23°C et de 50% hygrométrie relative pendant 24 heures afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes. La masse initiale (M_0) des cylindres est déterminée avant leurs immersions dans des solutions acides.

Des solutions d'acides chlorhydriques avec des concentrations initiales de 5% en volume ont été préparées dans des récipients résistants à l'acide (Figure 66.). Ces solutions ont été placées à une température ambiante de 23°C. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouvert d'environ 2 cm de solution acide selon ASTM C 267. Pour le ph de la solution acide il doit être compris entre 1et 3 selon ASTM C1012.



Figure 66. Acide Hcl sous forme liquide et le $MgSO_4$ sous forme solide

La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides est évaluée physiquement (variation de masse) et visuellement.



Figure 67. Acide Hcl sous forme liquide et le $MgSO_4$ sous forme solide



Figure 68. La réaction chimique lors d'immersion des éprouvettes de béton et mortier dans la solution acide Hcl.

6. 2. Attaques sulfatiques externes ($MgSO_4$)

Les essais utilisés pour étudier la résistance des bétons aux attaques sulfatiques sont très divers, parmi eux [41]. Ils ont deux fonctions principales : dégrader le béton et quantifier cette dégradation. Etant donné que les sulfates sont essentiellement présents dans des solutions aqueuses, le principe de base des essais consiste le plus souvent à immerger des éprouvettes en béton dans une solution sulfatique.

Dans notre étude, des essais d'immersion dans la solution de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) ont été effectués.

Selon la norme ASTM C1012-04, le pH de la solution de sulfate doit être compris entre 6 et 8 et la solution doit être renouvelée chaque semaine, ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de magnésium. Pour cela, nous avons adopté la méthode de Mehta comme illustré [100] qui recommande la correction de la solution déjà utilisée, par l'ajout d'une quantité d'acide sulfurique ($0,1\text{ N H}_2\text{SO}_4$) jusqu'à l'obtention du pH de la solution de départ (entre 6 et 8). La correction est réalisée quotidiennement au cours des premières semaines d'essai, ensuite elle devient hebdomadaire. Les solutions sont renouvelées chaque mois.

6. 3. Attaques par l'eau de mer

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- agressions mécaniques dues à l'action des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues,
- agressions chimiques dues à l'action, en particulier, des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer et dans certains cas, à la pollution des eaux,
- agressions climatiques dues aux variations de température,
- agressions biologiques de micro-organismes.

Les structures situées en site maritime sont exposées à plusieurs types de configurations. Elles peuvent être :

- continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer, même à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes,
- alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse). Les bétons situés dans les zones de marnage sont soumis 2 fois

par jour à des imprégnations d'eau de mer alternant avec un essorage et donc à des cycles humidification-dessiccation et ce sont donc les plus agressés,

- soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues. Ces zones de hauteur variable sont situées au dessus du niveau de l'eau à marée haute,

- continuellement émergées, donc sans contact direct avec le milieu marin, mais soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures. Les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ; pour les bétons de structure, la norme NF EN 206-1 étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte,

- soumises à l'air véhiculant du sel marin uniquement.

La salinité des mers ou des océans peut être très variable, de quelques grammes par litre à plus de 200 g/l.

La salinité des grands océans est de l'ordre de 35 g/l.

Pour notre cas on a ramené de l'eau de mer, on a émergé nos éprouvettes âgées de 28 jours et conservées dans l'eau du robinet, à différents pourcentages de poudre de verre, nous avons également suivi l'évolution des surfaces d'échantillons et leur microstructures, la perte de masse et la résistance mécanique en compression à différents âges d'émersion.

6. 4. Mode opératoire

Pour évaluer la durabilité des mortiers et bétons BHP avec les différents pourcentages de poudre de verre utilisés et de pouvoir évaluer l'effet de la poudre de verre sur la résistivité aux attaques chimiques, on a réalisé des essais mécaniques, physiques et chimiques sur des éprouvettes de bétons immergées pendant 180 jours dans les solutions de 5 % d'acide chlorhydrique, 5% de sulfate de magnésium, l'eau de mer et dans l'eau douce (milieu de référence) Pour cela on a procédé comme suit :

-Suivi de l'évolution de la résistance à la compression ;

-Suivi de la variation de masse ;

-Analyse visuelle de l'état des éprouvettes



Figure 69. le PH mètre utilisé et le contrôle du ph des deux solutions

- **Suivi de la variation de la masse**

Le suivi de la variation de la masse est effectué sur des éprouvettes cubiques de mortier et cylindriques de béton. Après démoulage, les éprouvettes sont mises directement dans l'eau jusqu'au jour de l'essai.

Après 28 jours de conservation dans l'eau saturée en chaux à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, elles seront soumises à l'attaque chimique, des échantillons de chaque formulation ont été mis dans des milieux différents :

-5% Hcl acide chlorhydrique

-5% MgSO_4 sulfate de magnésium

-Eau de mer

-L'eau du robinet (témoin).

- l'air libre (seulement pour le mortier)

Après cette période de cure, les éprouvettes seront pesées pour déterminer leur poids initial avant l'attaque chimique, puis immergées dans les solutions. Après l'attaque chimique et à l'échéance considérée, les éprouvettes seront pesées avec une balance de précision de 0.01g, selon la procédure de la norme ASTM C 267 : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération de mesure de pesées sera effectuée aux échéances 7, 14, 28 et 180 jours.

La résistance aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans les solutions sera évaluée selon la norme ASTM C 267 en mesurant la perte de masse. L'évaluation s'effectuera en mesurant la perte de masse des échantillons de la manière suivante :

$$VM\% = \left[\frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100 \quad \dots\dots\dots (20)$$

Avec VM : variation de la masse en (%)

M₀ : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme);

M_i (i=1, 2, 3,..., 12) : la masse après 1, 2, ..., 12 semaines d'attaque en (gramme).



Figure 70. La prise de la masse d'échantillons avant et après immersion

La mesure de la masse est réalisée durant 180 jours. Le mode opératoire suivi pour chaque mesure consiste à retirer de son milieu de conservation l'éprouvette, l'essuyer avec un tissu sec et la laisser pendant 30 minutes à l'air libre du laboratoire. Ensuite, la pesée est effectuée puis enregistrée. L'éprouvette est ensuite remise dans son milieu de conservation. La variation de masse sous attaque sulfate est évaluée de même que la variation de masse sous attaques acides par l'équation 20.

Remarque : les trois échantillons de chaque formulation utilisés pour le suivi de la variation de masse seront aussi utilisés pour mesurer la résistance à la compression.

- **Suivi de la résistance à la compression**

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes de mortier et béton, trois échantillons de chaque formulation sont étudiés en utilisant les presses adaptées. Avant l'écrasement, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée avec un tissu sec et laissée pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire.

- **Détermination de la profondeur de dégradation**

Cet essai consiste à pulvériser un échantillon fraîchement écrasé avec une solution de phénolphtaléine, les parties carbonatées restent incolores tandis que les parties saines deviennent roses (Figure 71). La profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide d'une règle graduée et correspond à la distance moyenne entre la surface externe et le front de coloration. La profondeur est obtenue par :

$$D = \sum_i^n D_i / n \quad \dots\dots\dots (21)$$



Figure 71. Principe de la profondeur de dégradation

• **Etude visuelle**

Une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) entre l'état de chaque échantillon avant et après immersion dans les différents milieux de conservation solutions.

Comme récapitulatif : La Figure 72 résume le mode opératoire adopté pour le suivi de la durabilité des échantillons de béton et mortier. (L'environnement A n'est pas appliqué pour les BHP).

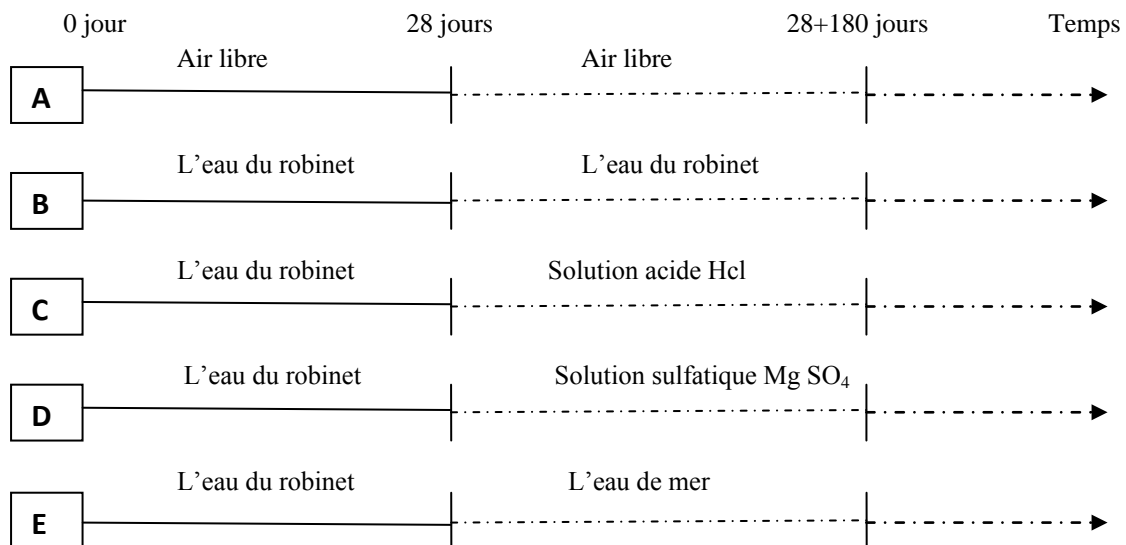


Figure 72. Les différents environnements de conservation étudiés pour les mortiers

Conclusion

Cette partie expérimentale a pour objectif en premier lieu de mettre en évidence l'influence de la substitution de ciment par de la poudre de verre sur le comportement physico – mécaniques des mortiers et bétons a hautes performances. Il vise en second lieu à caractériser les BHP à l'état frais conformément aux normes citées et étudier leurs performances mécaniques et leur durabilité en vers l'attaque des acides, des sulfates et l'eau de mer.

Nous avons adopté pour toutes les formulations le même rapport Eau/Liant, le même squelette granulaire et le même volume de pâte. Tous ces essais devraient permettre néanmoins dans un premier temps, la détermination des propriétés révélatrices, directe ou indirecte, de l'influence de la poudre de verre sur les performances des BHP ainsi que leur durabilité.

Chapitre 6

Méthode de formulation des BHP

Introduction

Le béton a connu ces vingt dernières années des développements considérables. Il a profité en particulier des évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production. Au-delà des progrès constants du matériau, (sur son ouvrabilité, ses performances mécaniques et sa durabilité), les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées depuis 10 ans et ont abouti aujourd'hui aux solutions les plus innovantes tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont devenus les matériaux de la modernité et de l'innovation.

L'étendue de leurs performances physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse. Les qualités initiales de résistances mécaniques se sont déclinées, différenciées. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont complexifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus diversifiées, à des résistances toujours plus importantes, à des exigences de durabilité plus fortes, à des contraintes esthétiques et à de nouvelles exigences de mise en œuvre (maîtrise de la rhéologie, pompabilité, etc.).

Le béton, composé essentiellement de constituants minéraux, offre des qualités intrinsèques : durabilité, comportement mécanique et résistance aux agressions chimiques, tenue au feu, qualités acoustiques, diversité des formes, des couleurs et des aspects, qui sont les garants d'ouvrages pérennes, efficaces, écologiques, économes et harmonieux.

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis. Elles ont débouché sur la mise au point d'une gamme de bétons aux nouvelles performances. Les résistances, la durabilité, l'ouvrabilité et les qualités esthétiques ont enregistré des avancées considérables.

DES BHP... (Bétons à Hautes Performances)

Les recherches sur l'amélioration des résistances mécaniques ont abouti à la mise au point de bétons : les BHP (Bétons à Hautes Performances) bétons très compacts utilisés pour leurs résistances élevées aussi bien à court terme qu'à long terme et leur durabilité exceptionnelle.

AUX BAP... (Bétons autoplaçants)

Les travaux menés sur l'ouvrabilité des bétons ont permis la mise au point de bétons dits autoplaçants, bétons très fluides, homogènes et stables. Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau facile à mettre en œuvre, sans faire appel à la vibration ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers et en usines de préfabrication, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel. Les BAP sont particulièrement adaptés pour les ouvrages de grande hauteur ou de forme complexe et pour les éléments très ferrailés. Ces nouveaux bétons permettent d'obtenir des gains de productivité considérables et offrent de très bons résultats en matière de qualité esthétique des parements.

AUX BÉTONS FIBRÉS... ET AUX BFULHP

Issus des bétons fibrés, les BFUHP (Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances), aux propriétés mécaniques extraordinaires, laissent libre cours à l'imagination des architectes pour créer des structures allégées et élégantes. Leurs très hautes résistances à la compression et à la traction par flexion offrent de nouvelles possibilités constructives. La variété de leurs applications ne dépend plus que de l'ingéniosité des concepteurs. Les recherches en matière d'optimisation de formulation des bétons de ces dernières années permettent d'offrir des matériaux aux propriétés adaptables aux contraintes des chantiers et aux spécificités des ouvrages.

1 Caractéristiques des BHP

1.1. Consistance des bétons frais

Il est possible d'obtenir des bétons très fluides (cas du béton autoplaçant) ou au contraire avoir des bétons à très hautes performances très fermes.

1.2. Propriétés mécaniques

Résistance à la compression, résistance au très jeune âge, résistance en traction, aptitude à résister à la fissuration, etc.

1.3. Durabilité

La recherche d'une grande durabilité face aux agressions de l'environnement est un souci permanent.

1.4. Aspects esthétiques

Ils peuvent se créer au niveau de la micro-rugosité de surface, de la teinte, de la texture et ils sont déclinés par une multitude de traitements de surface.

Les BHP, les BAP, les Bétons Fibrés et les BFUP sont les bétons de demain, ils s'imposent progressivement. D'ici quelques années ces nouveaux bétons seront utilisés sur la grande majorité des chantiers. Ces nouveaux bétons sont une réponse :

- aux préoccupations environnementales ;
 - aux nouvelles exigences des normes européennes qui mettent en valeur l'importance de la durabilité des ouvrages ;
 - aux soucis d'amélioration des conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines ;
 - aux besoins des maîtres d'ouvrage vis-à-vis de la gestion durable du patrimoine ;
 - aux exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes ;
 - aux nécessités des gestionnaires d'ouvrages de limiter les coûts de maintenance et de réparations et de réduire les gênes aux usagers ;
 - aux contraintes économiques des entreprises ;
 - aux demandes croissantes de nos concitoyens pour l'amélioration de leur cadre de vie et de leur confort.
- Avec le béton, matériau du quotidien minéral et recyclable, les solutions constructives répondent à toutes les exigences en matière de sécurité, d'esthétisme et de durabilité et offrent de nouvelles potentialités d'expression et de créativité aux ingénieurs comme aux architectes.

Selon [12] La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

- **Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :**
 - sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
 - détermination des proportions des constituants ;
 - optimisation du squelette granulaire.
- **Optimisation du mélange en laboratoire:**
 - validation de la compatibilité ciment / adjuvant ;
 - ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation ;
 - vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
 - analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants
 - analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

- **Validation de la formule en centrale :**

- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- vérification des caractéristiques du béton.

2. L'optimisation de la formulation d'un BHP

Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

- **Déflocculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau**

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %). Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

- **Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire**

Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Des mélanges optimaux de grains (s'appuyant généralement sur quatre niveaux de taille de grain) permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire. Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais.

Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques.

Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.

3. Spécifications sur les constituants

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

- **Ciments:** conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- **Granulats :** conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).
- **Additions :** conformes aux diverses normes en vigueur – cendres volantes silicoalumineuses, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- **Adjuvants :** plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

Tableau 16. Quelques exemples de formulation pour 1 m³ BHP [12]

> PONT DE JOIGNY sans fumée de silice		> PONT DE JONCHE avec fumée de silice	
CEM I 52,5	450 kg	CEM I 52,5	420 kg
Granulat 6/20	1 027 kg	Fumée de silice	35 kg
Sable 0/4	648 kg	Gravillon 6/10	250 kg
Sablon	105 kg	Gravillon 10/14	730 kg
Eau	160 l	Sable 0/4	660 kg
Superplastifiant	11,25 kg	Sablon 0/1	140 kg
Retardateur	4,50 kg	Eau	152 l
		Superplastifiant	1,73 %

> VIADUC DU CROZET avec fumée de silice		> PONT RAIL TGV MÉDITERRANÉE sans fumée de silice	
CEM I 52,5 PMES	385 kg	CEM I 52,5 R CP2	425 kg
Gravillon 5/12	363 kg	Gravillon 12,5/20	655 kg
Gravier 12/20	694 kg	Gravillon 4/12,5	500 kg
Sable 0/5	785 kg	Sable 0/4	760 kg
Fumée de silice	31 kg	Eau	140 l
Eau	140 l	Superplastifiant	1,4 %
Superplastifiant	1,2 %		

4. Performances des BHP

4. 1. Des propriétés exceptionnelles à l'état frais

Les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité, une aptitude au pompage et un maintien de la plasticité dans le temps à l'état frais qui apportent de nombreux avantages lors de la mise en œuvre :

- garantie d'un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures ;
- amélioration de l'écoulement du béton, en particulier dans les zones très ferrillées ;
- réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité ;
- exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.

Le BHP présente aussi :

- une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
- une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.

4. 2. Des performances élevées aux jeunes âges

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP, leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges (par exemple, 15 MPa à 12 heures ou 30 MPa à 24 heures), ce qui autorise :

- des décintrements et des décoffrages rapides ; l'optimisation des cycles de coffrage/décoffrage et des séquences de production ;
- des délais avant mise en tension des armatures de précontrainte raccourcis ;
- la fabrication d'éléments préfabriqués, dans certains cas, sans utilisation de traitement thermique. Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

4. 3. Des résistances mécaniques importantes à long terme

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme en compression, traction, flexion et cisaillement. Ces performances se traduisent en particulier par :

- une résistance importante aux agents agressifs ;
- un faible risque de corrosion des armatures ;
- une forte résistance aux cycles de gel/dégel ;
- une faible perméabilité ;
- une meilleure adhérence acier/béton ;
- un fluage inférieur à celui des bétons traditionnels ;
- une augmentation du module d'élasticité ;
- une diminution des sections de béton.

5. Formulation du BHP étidié

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent dans la littérature que [101] a essayé d'étudier.

Pour notre travail on a fait le choix de formuler notre BHP avec une méthode simple et plus pratique, c'est la méthode de **Dreux-Gorisse** [18].

- **Pour le béton de référence**

- On fixe le dosage en ciment CPA (450 kg/m^3)
- On fixe le rapport E/C pour notre cas $E/C = 0.35$
- On détermine le point de saturation de notre ciment CPA avec le superplastifiant utilisé en gardant le même rapport E/C.
- On fixe un dosage en superplastifiant à 2 % en extrait sec par rapport au ciment ;
- On fixe notre diamètre maximal des granulats utilisés ;
- On détermine le squelette granulaire avec la méthode Dreux-Goriss;
- Pour terminer on ajuste la quantité d'eau pour obtenir un affaissement au cône $\leq 20 \text{ cm}$.

- **Pour le béton avec poudre de verre**

Nous garderons la même formulation de notre BHP de référence, sauf que nous allons substituer une quantité de ciment CPA par de la PV à 10%, 20 % et 30%.

On fixera une fois le rapport E/L et après le rapport E/C à 0.35, sachant que pour la formulation de référence le **L** (liant) représente le **C** (ciment), mais pour les bétons avec poudre de verre ce liant L égale quantité de ciment avec la poudre de verre ($L=C+PV$)

❖ Optimisation de squelette granulaire par la méthode DREUX GORISS:

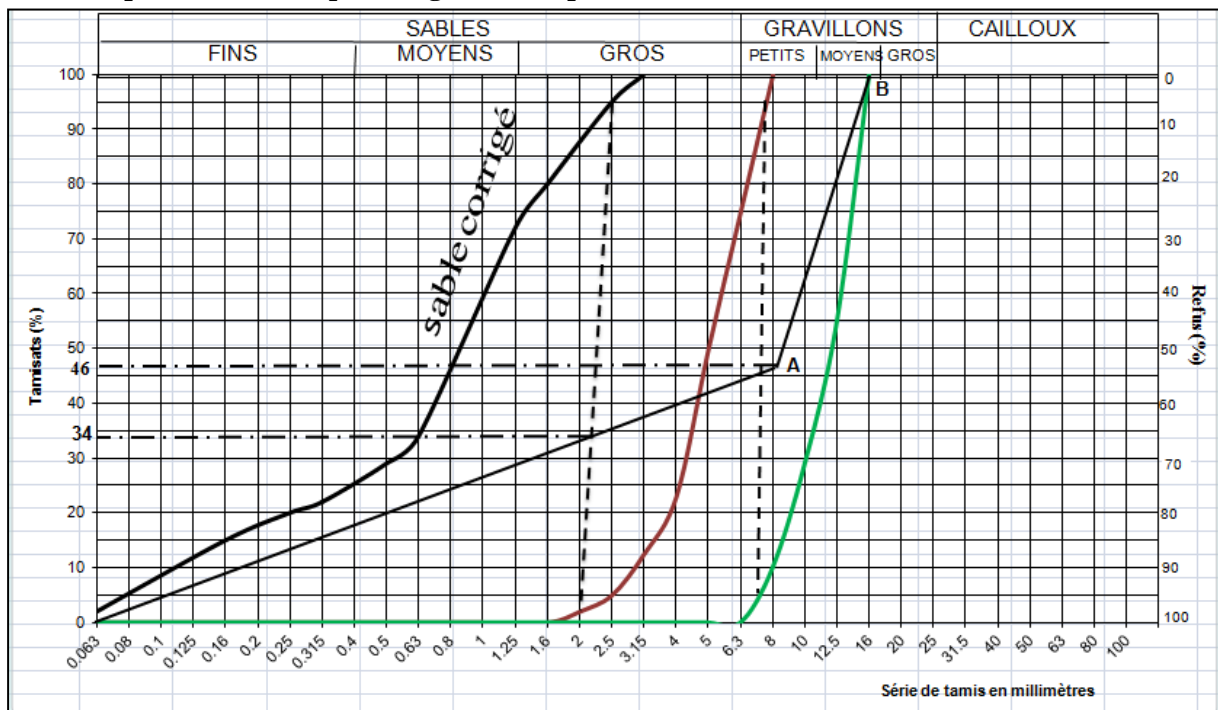


Figure 73. Optimisation de dosage pondéral des granulats par la méthode de DREUX-GORISS

La courbe granulaire de référence **OAB**, est déterminée par trois points :

L'origine **O** (0,0) ;

B (D max, 100% tamisât) ;

Un point de brisure **A** (X, Y), dont les coordonnées sont :

L'abscisse $X=16/2= 8$ si $D_{\max} \leq 25\text{mm}$

L'ordonnée $Y=50-\sqrt{D_{\max} +k}$; $D_{\max}= 16$ et $K= 6 M_f -15$, sachant le module de finesse de notre sable corrigé égale à 2.6

d'où $Y= 46.6$

D'après la courbe granulométrique (**Figure II.29**) on obtient :

Sable corrigé \longrightarrow 34%

Gravier 3/8 \longrightarrow 12%

Gravier 8/15 \longrightarrow 54%

On prend le coefficient de compacité égale à $\gamma = 0,825 - 0,03 = 0,795$. ($D= 20$ et granulats concassés)

Le dosage volumique en litre des constituants est :

- volume absolu total..... $V = 1000 \times \gamma = 795$ l
- volume absolu de ciment..... $V_c = 450 / 3.47 = 129.68$ l
- volume absolu des granulats $V_g = 795 - 129.68 = 665.32$ l

Le dosage pondéral des matériaux secs pour un m^3 (en kg/m^3) est :

- ◆ le sable..... $0,34 \times 665.32 \times 2.57 = 601.74$ kg
- ◆ $G_{3/8}$ $0,12 \times 665.32 \times 2.63 = 209.64$ kg
- ◆ $G_{8/15}$ $0,54 \times 665.32 \times 2.77 = 995.17$ kg
- ◆ Ciment..... 450 kg
- ◆ Eau..... 157.5kg

La composition finale de béton de référence est la suivante :

- ❖ Ciment CPA CEM I 52,5 $C = 450$ kg $V = 129.68$ l
- ❖ Sable $S = 601.74$ kg $V = 226.2$ l
- ❖ Gravillon (3/8 + 8/15) $G = 1204.81$ kg $V = 439.07$ l
- ❖ Eau $E = 157.5$ l
- ❖ Superplastifiant en extrait sec $A = 2\% C$ $V = 2.59$ l

→ **Remarque** : Pour des besoins de comparaison on a formulé également un béton ordinaire avec un rapport d'E/L et E/C égale à 0.5 (voir la composition au niveau de l'**annexe E**) pour mieux comprendre le comportement de ces bétons substitués de poudre de verre.

6. La composition massique des BHP étudiés

Les différents BHP ayant fait l'objet d'étude dans cette partie du projet sont récapitulés dans le tableau 17. Ce tableau précise le type de bétons suivant les rapports E/L et E/C, leur dosage en liant, ainsi que l'ajout cimentaire considéré et son taux d'incorporation. Pour un rapport E/L donné, des bétons incorporant soit 10,20 ou 30 % de poudre de verre sont confectionnés, Figure 74. Dans cette partie du programme expérimental, des bétons par rapport E/L variable sont confectionnés, soit un total de dix (10) bétons différents considérés dont la composition massiques des différents constituants est illustrée sur le tableau 18.

Tableau 17. Les Bétons BHP confectionnés avec les paramètres à varier

Rapport E/L	0.35	0.5
Rapport E/C	0.35	0.5
Dosage en liant (kg/m ³)	450	400
Poudre de verre et taux d'incorporation	0% PV	
	10% PV	
	20% PV	
	30% PV	

Tableau 18. La composition massique des différents BHP étudiés

	Unité	BHPR	BHPL1	BHPL2	BHPL3	BHPC1	BHPC2
<i>% de PV</i>	%	0	10	20	30	10	20
<i>Ciment</i>	Kg/m ³	450	405	360	315	405	360
<i>PV</i>	Kg/m ³	0	45	90	135	45	90
<i>Eau</i>	l/m ³	157.5	157.5	157.5	157.5	141.75	126
<i>E/L</i>	/	0.35	0.35	0.35	0.35	/	/
<i>E/C</i>	/	0.35	/	/	/	0.35	0.35
<i>Sable</i>	Kg/m ³	602	602	602	602	602	602
<i>G 3/8</i>	Kg/m ³	210	210	210	210	210	210
<i>G 8/15</i>	Kg/m ³	995	995	995	995	995	995
<i>SP</i>	l/m ³	9	9	9	9	8.1	7.2

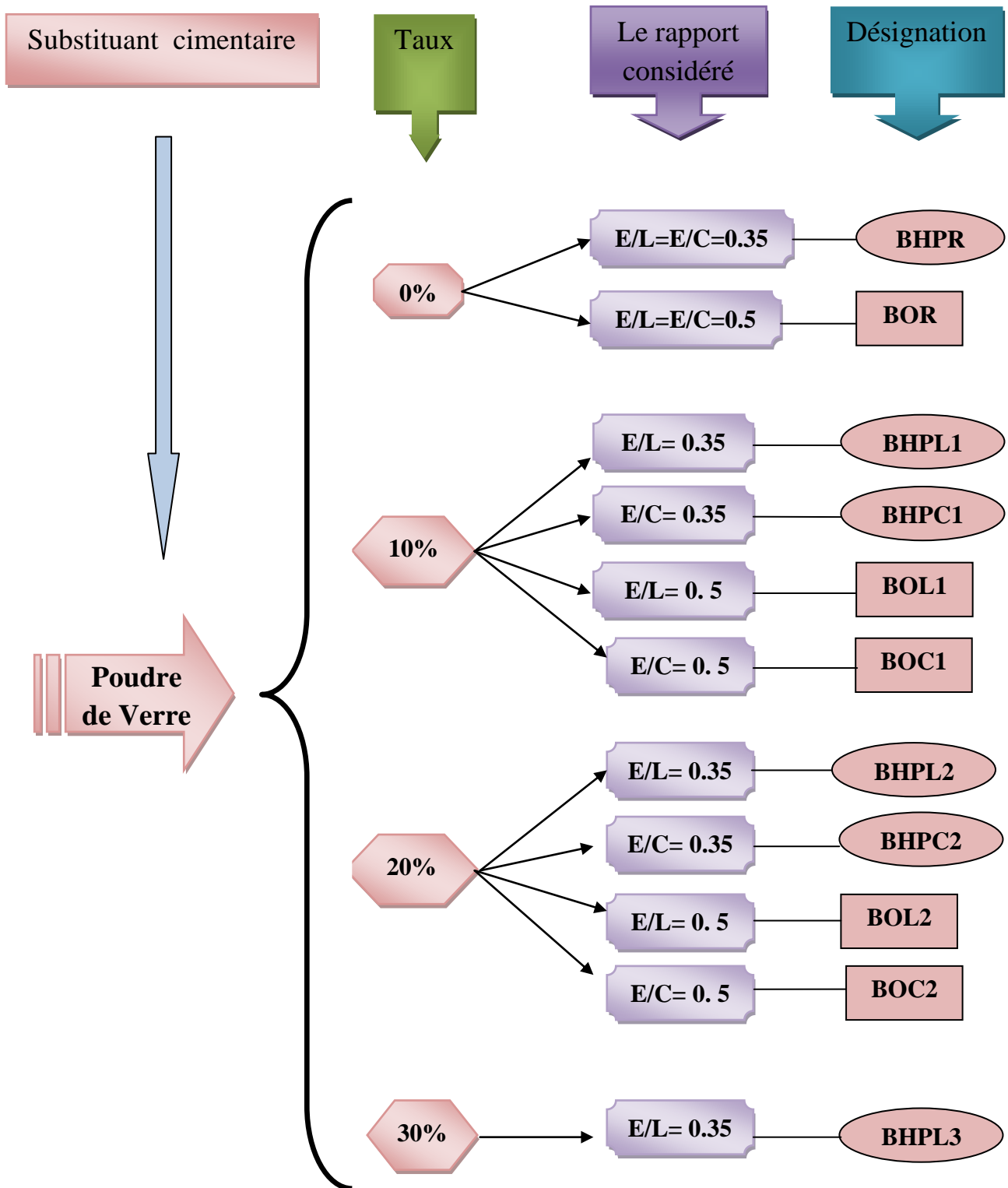


Figure 74. Les Différents bétons BHP confectionnés

Chapitre 7

Résultats d'essais sur pâtes et mortiers

Ce chapitre regroupe les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre recherche, ainsi que leurs interprétations. Il s'agit des essais de caractérisation propres aux pâtes, mortiers de ciment à l'état frais et durci. Des essais de prise ont été menés afin de mettre en évidence l'effet de la poudre de verre sur les temps de début de prise, fin de prise, consistance, étalement au mini cône, point de saturation, indice d'activité pozzolanique, résistance à la compression et à la flexion des mélanges dont ils sont composés.

1. Caractérisation à l'état frais

1.1 Consistance normale et temps de prise

Les essais de consistance normalisée ont été réalisés et les temps de début et fin de prise mesurés selon la norme NF EN 196-3 pour les pâtes sans et avec poudre de verre des deux ciments CPA et CPJ. Les résultats de ces essais physiques de caractérisation des pâtes normalisées sont présentés dans les figures ci-dessous.

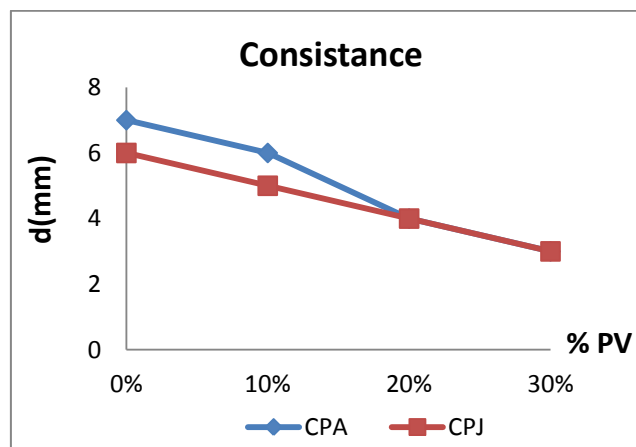


Figure 75. Consistance des pâtes en fonction des pourcentages de substitution de la PV

On remarque pour les deux ciments que la consistance diminue avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre pour les deux ciments utilisés, ce qui montre qu'il y a un surplus d'eau puisque $d < 5$ mm (voir chapitre 5), cela peut être expliqué par la différence de surface spécifique de cette PV avec celle du ciment et par la non absorption de la PV à l'eau de gâchage se qui augmente la quantité d'eau libre dans la matrice cimentaire. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

Néanmoins la consistance du ciment CPA reste supérieure à celle du ciment CPJ pour la pâte sans et avec 10% de PV, ce qui nous donne une idée sur la nature des fines ajouts qui rentre dans la production du ciment CPJ : les fines ajouts ont une faible demande en eau.

Le tableau 19 et la figure 76 donnent les valeurs des temps de début et fin de prise, mesurés sur des pâtes témoins et celles contenant 10, 20 et 30 % de PV par rapport au dosage en volume du ciment pour les deux ciments.

Tableau 19. Temps de début et fin de prise des différentes pâtes

	Pourcentage de poudre de verre	Début de prise (minutes)	Fin de prise (minutes)
Ciment CPA	0%	128	313
	10%	148	322
	20%	170	334
	30%	192	369
Ciment CPJ	0%	110	295
	10%	135	305
	20%	145	320
	30%	162	341

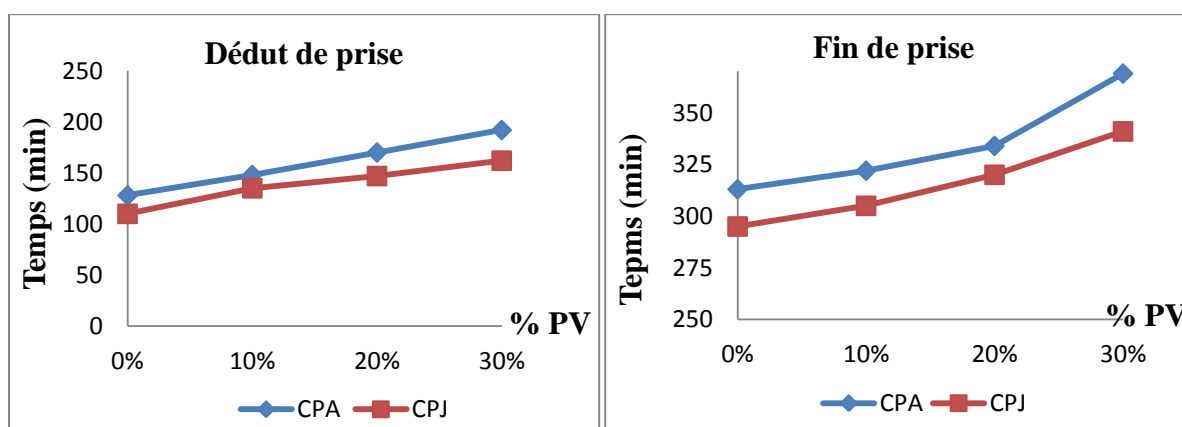


Figure 76. Les temps de prise en fonction des pourcentages de substitution de la PV

Concernant le temps de prise et d'après les résultats de la figure 76, il apparaît que la substitution de la poudre de verre affecte légèrement les temps de début de prise puisqu'un écart de 42 minutes est enregistré entre la pâte sans PV et celle dont 20% de ciment CPA ont été remplacés par la PV. On note par ailleurs des temps de prise pour le ciment CPA dépassants les temps de prise du ciment CPJ se qui montre que les ajouts cimentaires utilisés par la cimenterie de Sour el Ghouzlane GICA lors de la fabrication du ce ciment CPJ affecte les temps de prise par augmentation et ceux en présence ou en absence de poudre de verre.

Cependant nous remarquons également que ces derniers augmentent avec l'augmentation des dosages en PV pour les deux types de ciments ce qui présente un intérêt de la manœuvre en cas de bétonnage par temps chaud.

1. 2 Essai d'étalement et détermination du point de saturation en superplastifiant

L'essai d'étalement utile pour déterminer la compatibilité du ciment et superplastifiant appelé le point de saturation qui est évalué en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse totale de ciment CPA, a été déterminé dans le laboratoire Unité de Recherche (URME) de Boumerdes à l'aide d'un rhéomètre et sa valeur été de 2% de la masse du ciment, mais pour des besoin de confirmation nous avons vérifié ce résultat grâce l'essai au mini cône en maintenant la valeur de E/C = 0,35 pour les

coulis ciment sans poudre de verre, cette valeur de point de saturation va nous servir après pour la confection des différents mortiers et BHP.

L'essai a été effectué en malaxant 250g de ciment CPA avec de l'eau (E/C=0.35) avec une quantité d'adjuvant sachant que cette dernière change en commençant par un pourcentage de 1.2% jusqu'à ce que le point de saturation soit atteint. Après avoir versé le mélange ciment+ eau + adjuvant dans le mini cône, un cercle de pate se forme sur la plaque en plexiglas, on mesure alors les deux diamètres du cercle pour prendre leur moyenne tel que:

$$D = \left(\frac{D1+D2}{2} \right) \quad \dots (22)$$



Figure 77. Mesure du diamètre d'étalement.

Le point de saturation en SP de notre ciment CPA est le diamètre maximal d'étalement uniforme qui est de 2% compatible avec la valeur obtenue au laboratoire, le résultat est représenté sur la figure 78.

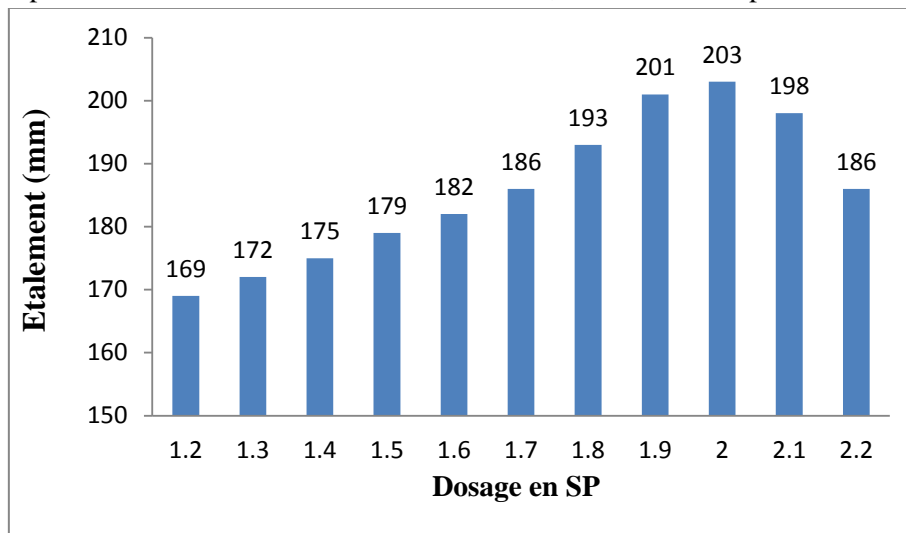


Figure 78. Mesure du diamètre d'étalement.

Au-delà d'un étalement de 203 mm pour un dosage de 2%, le mélange est instable, l'extrémité des galettes d'étalement n'est pas uniforme, présence de ressuage et sédimentation des particules fines. Une sursaturation en SP se produit, ce qui induit un mélange hautement déstructuré et donc pas assez visqueux pour maintenir les particules fines en suspension.

Pour montrer la différence de fluidité des ciments CPA contenant la PV l'essai d'étalement a été effectué, les maniabilités des pâtes fraîches furent déterminées par l'essai d'étalement au mini cône avec une quantité d'eau constante pour la préparation de toutes les pâtes ($E/L = 0.35$) ou le L représente dans notre cas la somme du ciment CPA et PV, les valeurs des résultats sont données dans la Figure 79. La maniabilité des pâtes augmente avec l'augmentation du taux de substitution des ciments CPA et CPJ par la poudre de verre. Cette augmentation de la maniabilité relative aux pâtes avec poudre de verre est traduite par la variation de la surface spécifique des pâtes grâce à la grande finesse de la poudre de verre par rapport aux ciments et donc une diminution de demande en eau, chose qui peut influencer négativement ou positivement sur les caractéristiques mécaniques.

Vis à vis de la nature du ciment on remarque que l'étalement du ciment CPJ est supérieur à l'étalement du ciment CPA avec ou sans poudre de verre due aux mêmes raisons expliquées précédemment dans les résultats des temps de prise, ce qui donne un point de saturation de 1.5% en superplastifiant pour le ciment CPJ déterminé également au laboratoire de Boumerdes. (Voir les formulations)

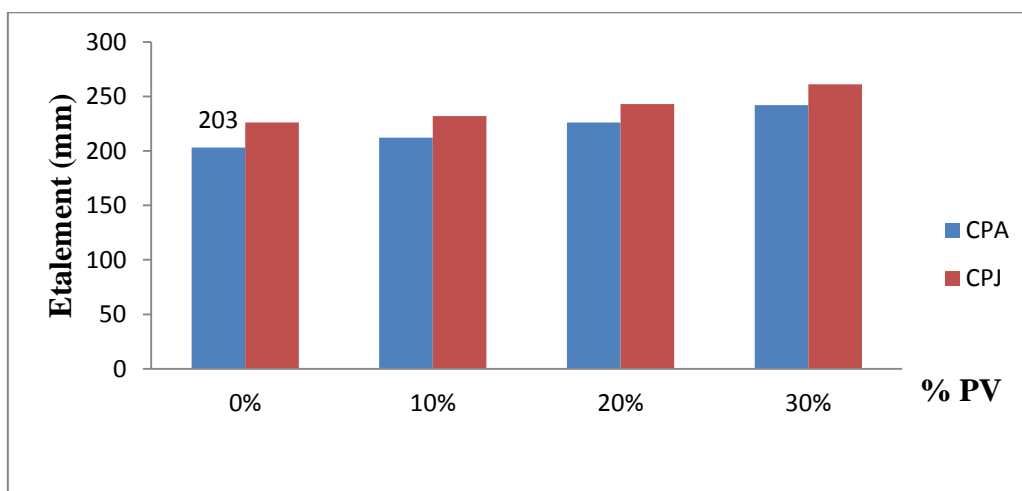


Figure 79. Etalement des pâtes en fonction du % de la poudre de verre

2. Caractérisation à l'état durci

2.1 Activité pouzzolanique

La plupart des matériaux pouzzolaniques contiennent une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau peut se combiner à l'aide de la température libérée par l'hydratation du C_2S et C_3S , avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté (C-S-H) similaire à celui qui est formé durant l'hydratation du ciment portland.

Un matériau pouzzolanique doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Produit à forte teneur en silice
- Un matériau amorphe
- Surface spécifique élevée.

On peut donc écrire une réaction pouzzolanique de façon simple :



Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines ; cependant, plus la pouzzolane est fine et vitreuse plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment libère une grande quantité de chaux à la suite de réaction d'hydratation du C_3S et C_2S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte de ciment hydraté, elle peut même être responsable du problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau; ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte ciment ; ce qui augmente la perméabilité de lessivage, le seul aspect positif de la présence de la chaux dans un béton est qu'elle contribue à un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche d'oxyde de fer qui passive les armatures et l'acier.

La réaction pouzzolanique dans le béton se développe par consommation de la portlandite (CH) et produit du silicate de calcium hydraté (C-S-H) qui peut augmenter la résistance en compression des mortiers et bétons. Ainsi les alcalins du verre peuvent être incorporés dans la formation du gel C-S-H pendant l'hydratation, lorsque les ions de sodium sont substitués par le calcium, il y a plus d'ions de calcium qui sont disponibles pour la formation de portlandite (Gilber et al cité par [64])

❖ **L'indice de pouzzolanité I** est une façon d'évaluer la réactivité pouzzolanique du verre dans le mortier à l'âge de 28 jours.

Selon la norme ASTM C618, un matériau est considéré comme étant pouzzolanique si:

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$
- Son indice d'activité **I** est : $0,67 < I < 1$

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement le degré de réaction dans le temps ou le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et le $Ca(OH)_2$ en présence d'eau [102]. L'indice d'activité est déterminé à travers des essais mécaniques de compression sur des éprouvettes de mortier 40x40x160 mm³. Il est donné par le rapport entre la résistance à la compression d'un mortier avec p% d'ajout de mâchefer et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

$$I = (R_p / R_0) \times 100 \quad \dots (24)$$

Avec :

I= indice d'activité pouzzolanique

R_p = résistance à la compression du mortier avec le % de poudre de verre en masse de ciment

R_0 = résistance à la compression du mortier témoin avec 100% de ciment.

❖ **Evaluation de l'indice d'activité I**

A partir de la caractérisation minéralogique de la poudre de verre illustrée dans le Tableau 14 on constate que la somme des trois composants : l'alumine Al_2O_3 , oxyde de silice SiO_2 et d'oxyde de fer Fe_2O_3 est d'environ 74,2 % qui dépassent la valeur limite exigée par la norme ASTM C618, donc la poudre de verre serait un matériau pouzzolanique si elle a un minimum de 67% comme indice d'activité à 28 jours avec un pourcentage **P = 25%** de substitution de ciment CPA par la PV . Le résultat est illustré sur la Figure 80. a, qui montre que nous avons obtenu à 28 jours d'âge, un indice d'activité supérieur à la limite normative de 67% pour un pourcentage en PV égale à 25%, la différence entre la valeur obtenue et la normative est $\Delta = 22.4\%$. Nous pouvons conclure que la poudre de verre présente une réactivité pouzzolanique.

La figure 80.b montre l'évolution dans le temps de l'indice d'activité obtenue avec les trois taux de substitution en masse de ciment par la PV étudiés dans ce travail (10%, 20%, 30%).

On remarque que toutes les valeurs de l'indice d'activité sont supérieures à la valeur normative de 67% pour tout âge étudiés avec une valeur minimale de 69.5% obtenus pour le mortier substitué de 30% de poudre de verre.

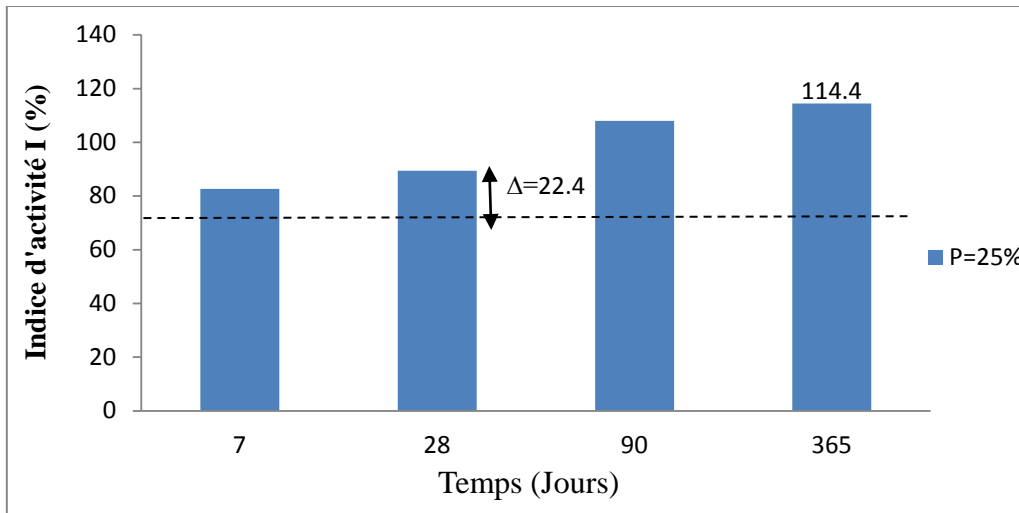


Figure 80. a Indice d'activité pouzzolanique pour P=25% de poudre de verre (de masse du ciment)

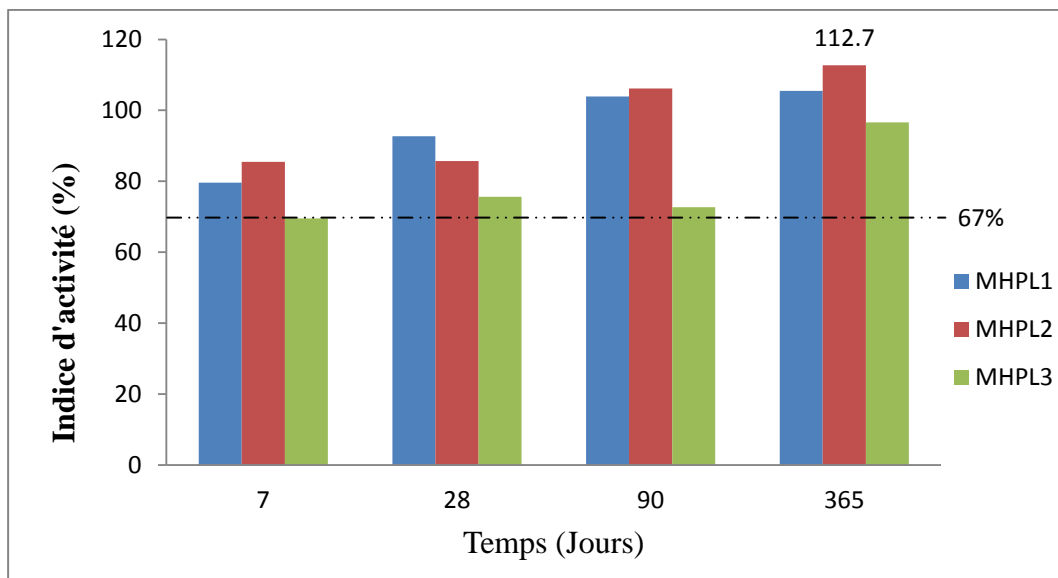


Figure 80. b. Indice d'activité pouzzolanique pour les trois pourcentages de PV à différents âges

Nous observons également une augmentation de cet indice d'activité dans le temps pour les trois mortiers, Il passe a un maximum obtenus a 365 jours qui de 112,7 % pour le mortier M20PV. Cette évolution attendue est attribué au développement de la réaction pouzzolanique.

En comparant les résultats de la figure 80.a et .b on conclue que la valeur d'indice d'activité obtenu a long terme pour un pourcentage de 25% en poudre de verre dépassent celui obtenu à 20% et 30% de poudre de verre à 365 jours ce qui donne une meilleure estimation sur le taux de substitution de notre ciment CPA avec le rapport E/L =0.35 est de 25%.

2. 2 Résistance à la compression

❖ Résultats sur mortiers avec le rapport E/L=0.35

La résistance mécanique en compression est obtenue par la rupture des éprouvettes cylindriques 4x4x16cm de mortier en variant la teneur en PV de 10%, 20% et 30%, elle est estimée après 7 jours, 28 jours, 90 jours et 365 jours de durcissement en milieu humide. Les résistances obtenues sont représentées sur la Figure 81.

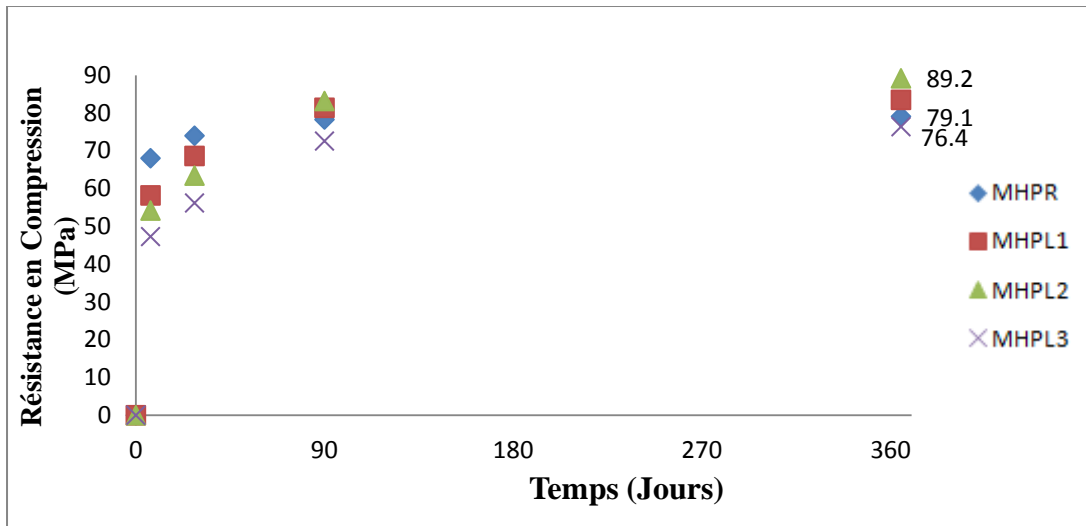


Figure 81. Evolution de la cinétique du durcissement en fonction du % de PV.

On observe que la résistance mécanique de tous les mortiers augmente puis se stabilise avec l'âge. Il apparaît également que les mortiers à 10% de PV se distinguent légèrement du mortier incorporant 20% et 30% de PV aux jeunes âges (7 et 28 jours) en développant des résistances qui s'approchent de celles du mortier témoin (MHPR) mais qui restent toujours inférieures.

A partir de l'âge de 90 jours, les mortiers avec PV (MHPL1 et MHPL2) développent des résistances à la compression supérieures à celles du mortier témoin sans PV (MHPR) et évoluent proportionnellement aux pourcentages de PV. En effet à 365 jours, les mortiers à 10 et 20% de PV développent un gain de résistance qui vari de 5 à 10 MPa par rapport au mortier témoin, par exemple la résistance du mortier avec 20% de PV était de 63,4 MPa à 28 jours et elle a augmenté pour atteindre 83.2 MPa à 90 jours et même atteindre les 89.2 MPa à 365 jours. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et qui se développe tardivement. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la PV et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré par l'hydratation du ciment ce qui donne à la PV la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances en utilisant un ciment sans ajouts CPA, résultats concordant avec les travaux de Idir [3].

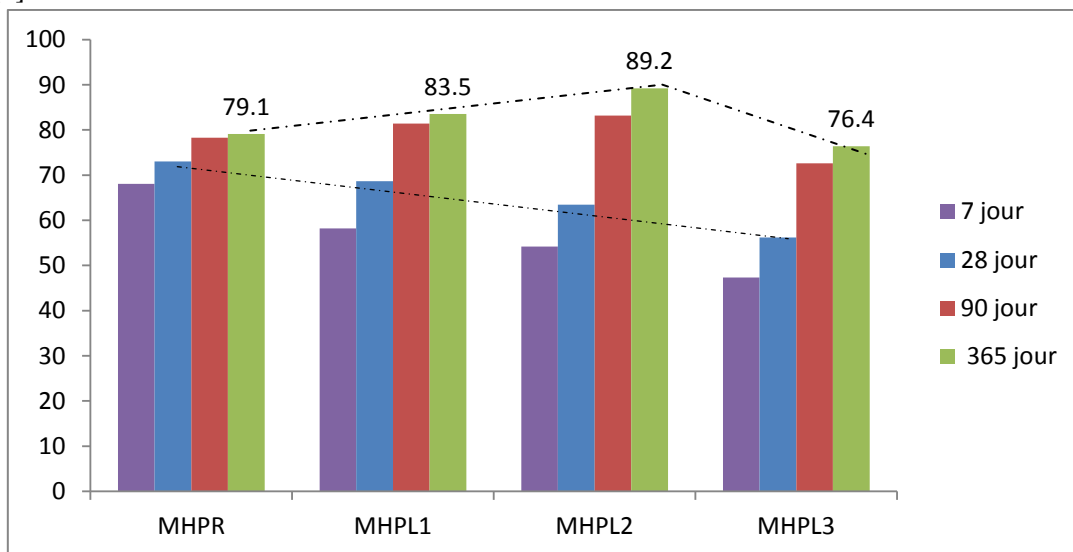


Figure 82. Influence du dosage en PV sur la résistance à la compression (MPa) à différents âges

Les résultats présentés à la Figure 82 indiquent que la résistance à la compression augmente d'une façon logique de 28 à 365 jours pour tous les spécimens.

On observe en outre que l'addition de PV dégrade la résistance à la compression mesurée entre 7 et 28 jours, comparativement au mortier témoin sans PV pour l'ensemble des composantes étudiées.

A 90 jours de prise, la résistance des mortiers avec poudre de verre s'avère cependant légèrement plus élevée que celle du mortier témoin sans PV, et croît avec le dosage en PV (10 et 20%), ce phénomène peut être expliqué par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui se manifeste à long terme d'après [3].

Les résultats de résistance à la compression à 90 jours suggèrent donc qu'un dosage de 20% de PV donne les meilleurs résultats obtenus (89,2 MPa) dans les conditions expérimentales testées avec ciment sans ajouts de classe CPA 52,5. D'autres auteurs [61] ont obtenu des résistances à la compression de 37 MPa à 90 jours pour 20% de PV avec un ciment de classe CPJ 42.5, l'effet de la poudre de verre dépend donc de la classe de ciment auquel on la substitue.

❖ Effet de l'accélération du durcissement [Étuvage] sur la résistance :

Les éprouvettes cubiques sont traitées par étuvage afin d'accélérer le processus de durcissement, 15 minutes après leur démoulage, elles ont subi un traitement comme montré sur la figure 83, après refroidissement elles sont rompues par compression (après un jour de durcissement). Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 84 et 85.

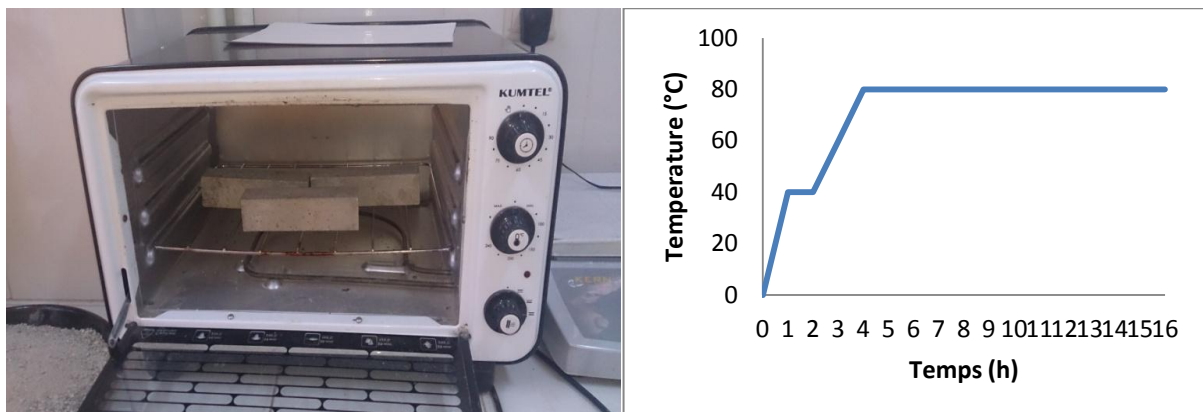


Figure 83. L'effet d'étuvage.

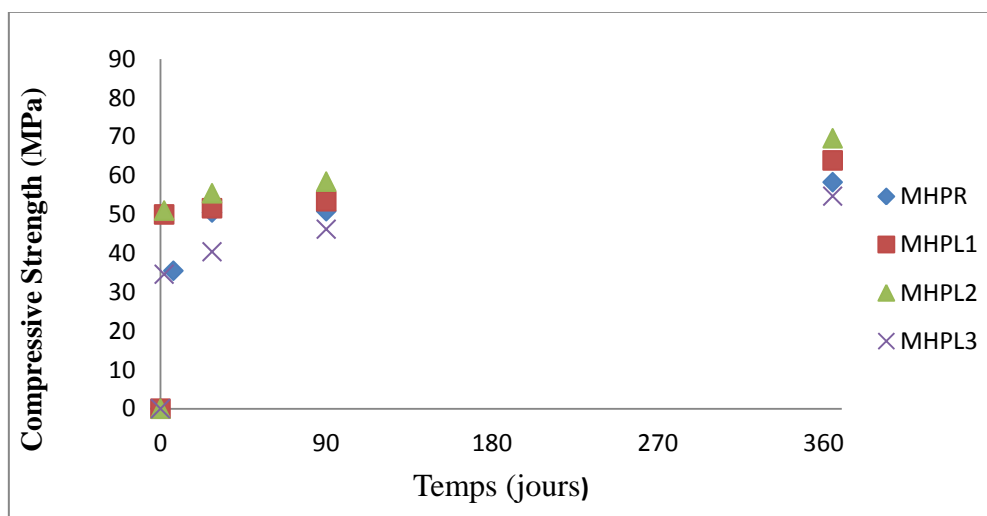


Figure 84. Evolution dans le temps de la résistance en compression sous l'effet de l'étuvage

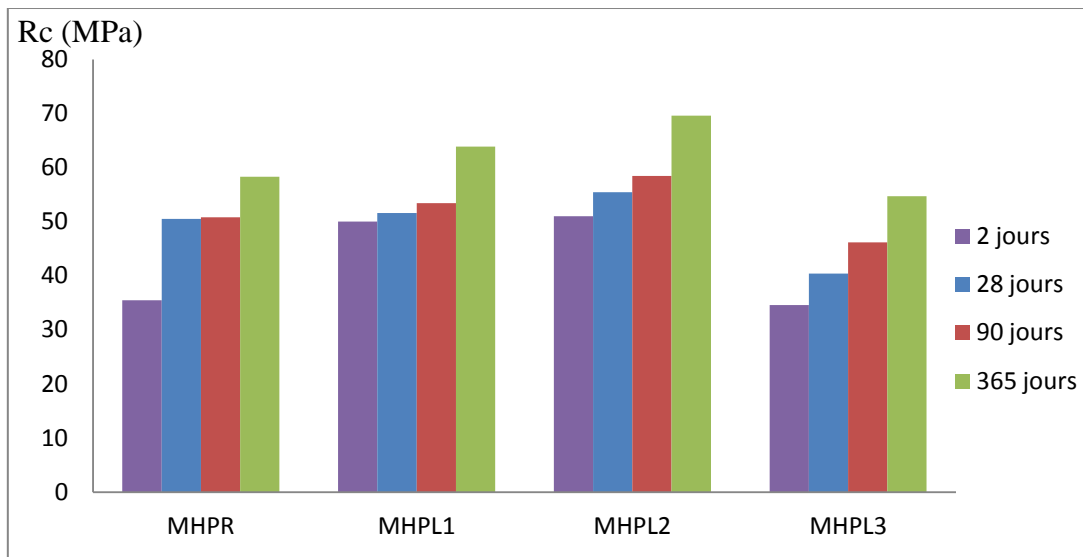


Figure 85. Effet de la PV sur la résistance en compression à différent âges sous l'effet de l'étuvage

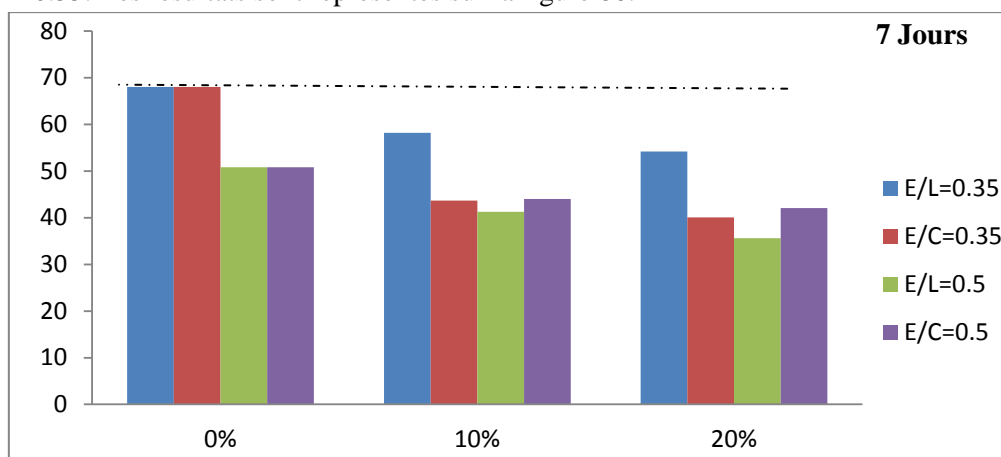
L'élévation de la température est bénéfique pour améliorer les résistances à l'âge précoce d'après [103], chose qui est valable pour les mortiers MHPL1 and MHPL2 comme le montre la figure 85 et non valable pour le mortier témoin MHPR qui sont à base de ciment CPA.

On remarque également que nous avons les mêmes résultats que ceux de la Figure 82 en terme de comportement de la poudre de verre, nous observons des résistances inférieures à jeune âge pour les mortiers à base de poudre de verre en comparant avec MOPV mais ces résistances augmentent pour dépasser celle du mortier témoin à 365 jour sauf pour le mortier MHPL3 qui reste toujours inférieur à MHPR.

L'étuvage doit probablement accélérer le durcissement, mais en comparant les résultats de la figure 82 et la figure 85 on constate que l'étuvage a considérablement affecté le phénomène de développement des résistances des ciments CPA avec PV ou on remarquant que les résistances de tous les mortiers qui ont subi un étuvage sont inférieures à celles des mêmes mortiers conservés à l'eau fraîche à différents âges.

❖ Etude de l'effet de la variation du rapport E/L et E/C

Nous avons évalué la résistance à la compression à différents âges de l'ensemble des mortiers étudiés en travaillant avec les deux rapports E/L et E/C et en variant également ces rapports par deux valeurs qui traduisent le comportement ordinaire avec $E/L=0.5$ et un autre comportement à haute performance avec $E/L=0.35$. Les résultats sont représentés sur la figure 86.



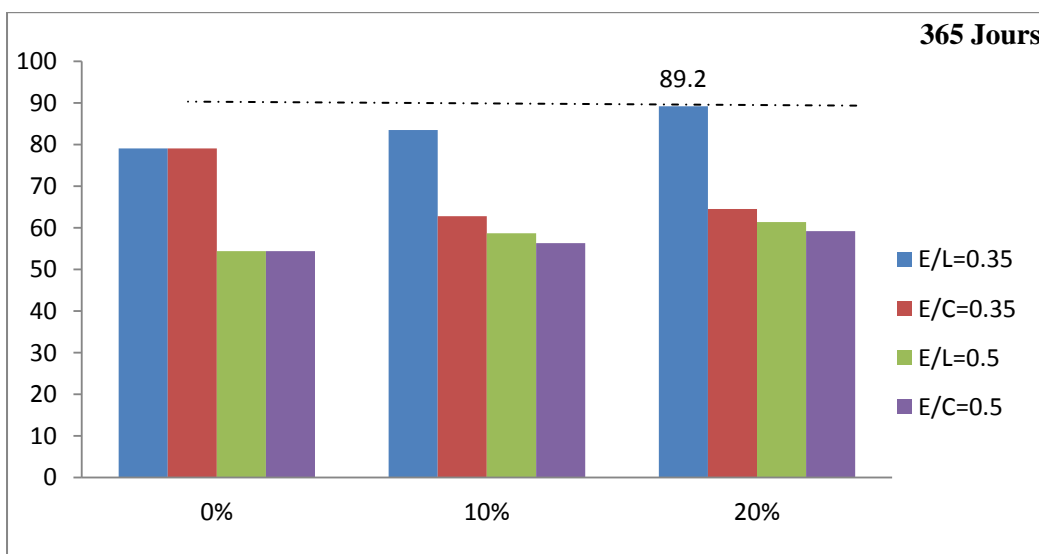
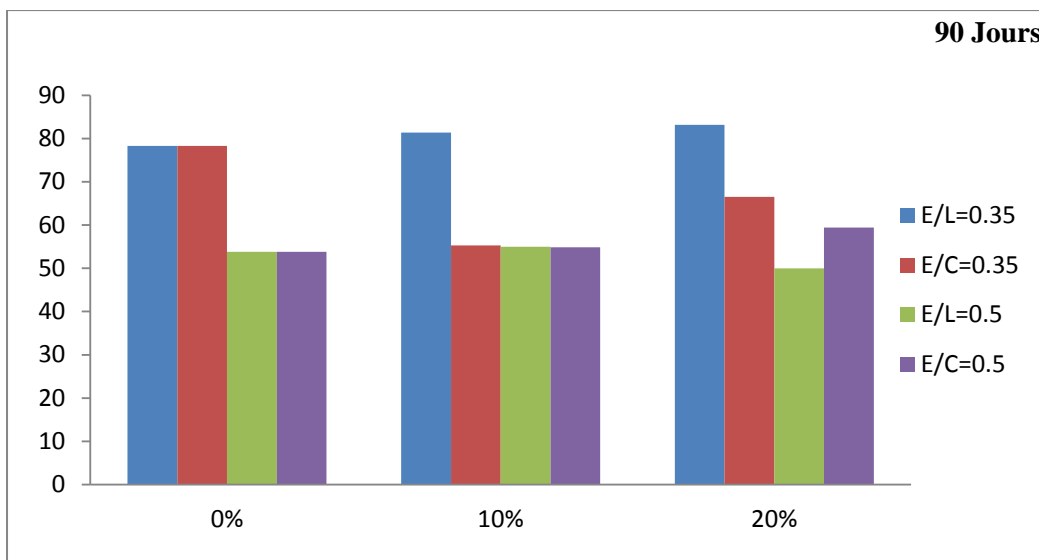
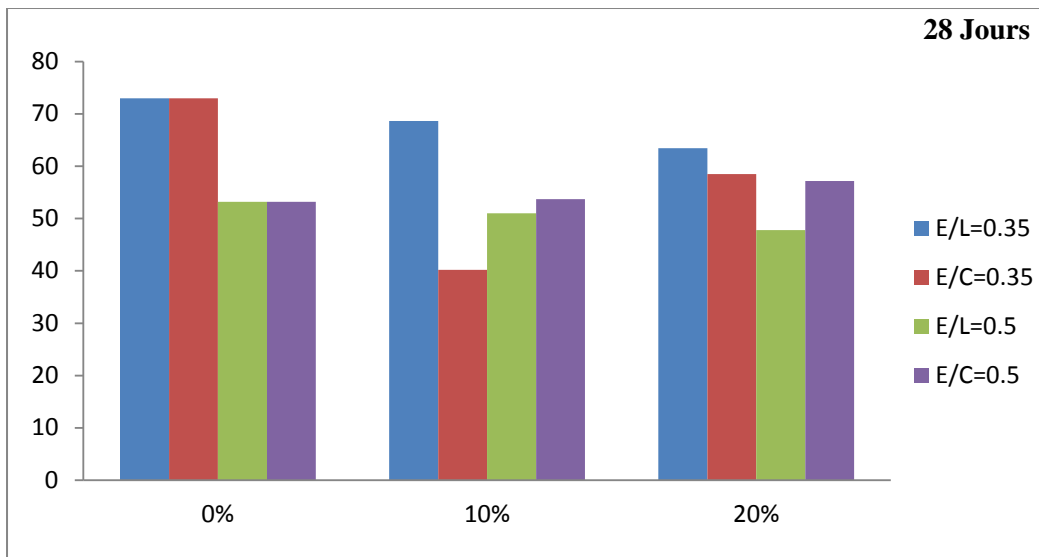


Figure 86. Effet de la variation des rapports E/L et E/C sur la résistance à la compression (MPa) en fonction du % de la PV à différent âges

Les résultats de la figure 86 montrent que la résistance à la compression se propage en fonction du temps et se détériore avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre par rapport au mortier témoin à 0% PV pour les rapports de $E/L = 0.35$ et $E/C = 0,35$ à jeune âge (7 et 28 jours) contrairement aux deux rapports $E/L = 0,5$ et $E/C = 0,5$ ou nous remarquons que la résistance des mortiers avec poudre de verre est supérieure à celle des mortiers sans poudre de verre chose qui était étudiée et confirmée par Zidol [48] que ces mélanges ayant donnés de meilleurs résultats étaient ceux confectionnés avec un fort rapport de E/L en présence de la poudre de verre . Au delà de 28 jours, la résistance des mortiers avec la poudre de verre a augmenté (90 et 365 jours) pour dépasser même la résistance de notre mortier témoin sans poudre de verre, ce qui s'explique par la réaction pouzzolanique pour les quatre rapports.

En terme de valeur de résistance à la compressions ou de rendement mécanique, on remarque que les valeurs des rapports E/L et E/C égale à 0.35 sont meilleurs que celles des deux autre rapports E/L et E/C égale à 0.5, ou par exemple nous avons obtenu pour le mortier a 20% de poudre de verre une résistance de 89.2 MPa ($E/L=0.35$) comparativement à la valeur de 51.4MPa ($E/L=0.5$).

On constate également que la résistance à la compression diminue en augmentant le rapport $E/L = 0.5$ par rapport à $E/L = 0.35$, elle augmente pour la valeur de 0.5 mais en travaillant avec le rapport E/C , d'où dans cette étude et en présence de poudre de verre pour une faible valeur du rapport (0.35) en travaille avec le E/L et pour une forte valeur du rapport (0.5) en travaille avec le E/C .

En terme de résistance le meilleur résultat était obtenu pour le rapport $E/L = 0.35$ par rapport aux trois autres rapports ce qui confirme les formulations à hautes performances en travaillant avec des faibles rapports de E/L .

❖ Etude de l'effet du ciment CPJ par rapport au ciment CPA

Dans cette partie nous avons évalué le comportement mécanique des mortiers avec et sans poudre de verre confectionnés avec les deux ciments CPA et CPJ utilisés lors de cette étude.

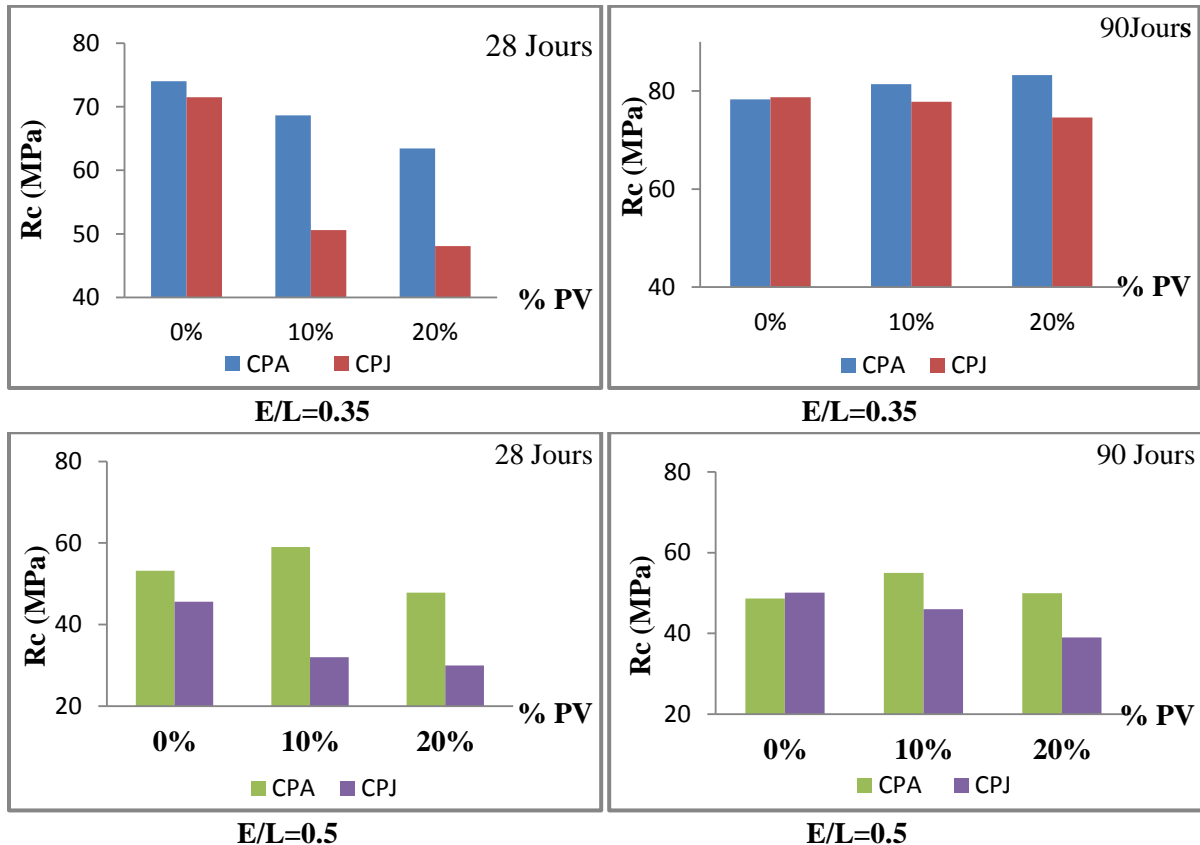


Figure 87. Effet du ciment CPJ et CPA sur la résistance à la compression à différent âges en fonction du pourcentage de la PV

La figure 87 montre que la résistance à la compression des mortiers durcis avec poudre de verre a jeune âge pour les ciments CPA et CPJ est inférieure à celle du mortier sans poudre de verre (0%), au-delà de 28 jours on constate que la résistance des mortiers à base de CPJ et poudre de verre est toujours inférieure à celle des mortiers sans poudre de verre mais plus au moins proche contrairement aux résultats du ciment CPA ou les mortiers avec poudre de verre dépassent la résistance du mortier témoin pour les deux rapports $E/L=0.35$ et $E/L=0.5$.

Nous remarquons également que la résistance à la compression des mortiers à base de ciment CPJ est inférieure à celle des mortiers à base de ciment CPA en raison de toutes les additions considérées lors de la fabrication du ciment CPJ dans les cimenteries comme indiqué par la composition chimique des deux ciments.

2. 3 Résistance à la flexion

Les résultats présentés à la Figure 88. a ; montrent que l'effet de la poudre de verre sur la résistance à la flexion est similaire pour les trois mortiers MHPR, MHPL1 et MHPL3, ou elle augmente entre 7 et 28 jours après suivie d'une chute maximale de l'ordre de 0.6 MPa à l'âge de 90 jours. Exception faite pour le mortier MHPL2 ou sa résistance à 28 et 90 jours était inférieure à celle enregistrée à 7 jours.

La substitution du ciment CPA par la poudre de verre donc améliore la résistance à la flexion à la fois à 7, 28 jours et à 90 jours de prise pour atteindre des valeurs maximales à l'âge de 365 jours, ou le mortier MHPL2 a atteint la valeur de 10.72 MPa à long terme pour dépasser celle du mortier témoin MHPR avec un gain de résistance de 13%, mais qui reste toujours supérieure à celle du mortier MHPL3. Le phénomène à 365 jours peut s'expliquer par une bonne adhérence entre les grains de ciment et de sable accrue en présence de poudre de verre se qui traduit en quelques sortes une bonne résistance à la traction.

Notant également qu'à tous âges les mortiers substitués de 10 et 20% de PV développent une résistance à la flexion supérieure à celle du mortier sans PV le MHPR, sauf pour le mortier MHPL3 à l'âge de 365 jours avec une résistance 8.04 MPa inférieure à celle du MHPR avec une valeur de 9.33 MPa.

Cela traduit le rôle physique et chimique joué par la PV à moyen terme et à long terme, d'après le taux de développement à 28, 90 et 365 jours :

- Un effet physique (filler): Une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice cimentaire.
- Un effet chimique (pouzzolanique): Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme et améliore les performances mécaniques à long terme des mortiers. Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CSH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [3]

Comme la résistance à la compression, il semble que la substitution du ciment par 20% de la poudre de verre donne de meilleurs résultats en comparaison avec le 10 et 30% à l'âge de 365 jours.

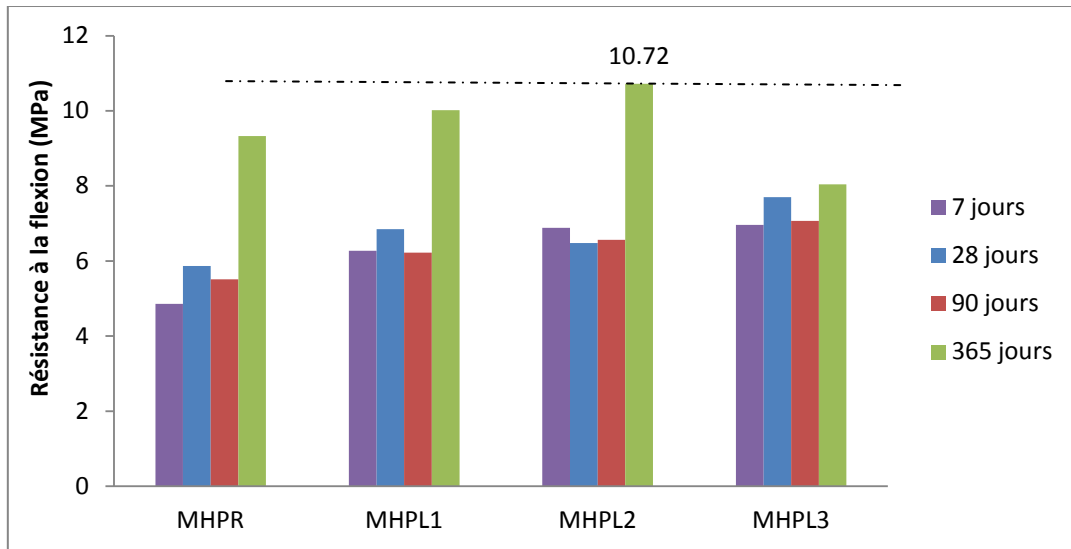


Figure 88. a. Influence du dosage en PV sur la résistance à la flexion (MPa) à différents âges

❖ Effet du rapport E/L et E/C

Comme pour la compression, nous avons étudié l'effet du rapport E/L et E/C en fonction du pourcentage de substitution de la PV sur la résistance en flexion des différents mortiers étudiés.

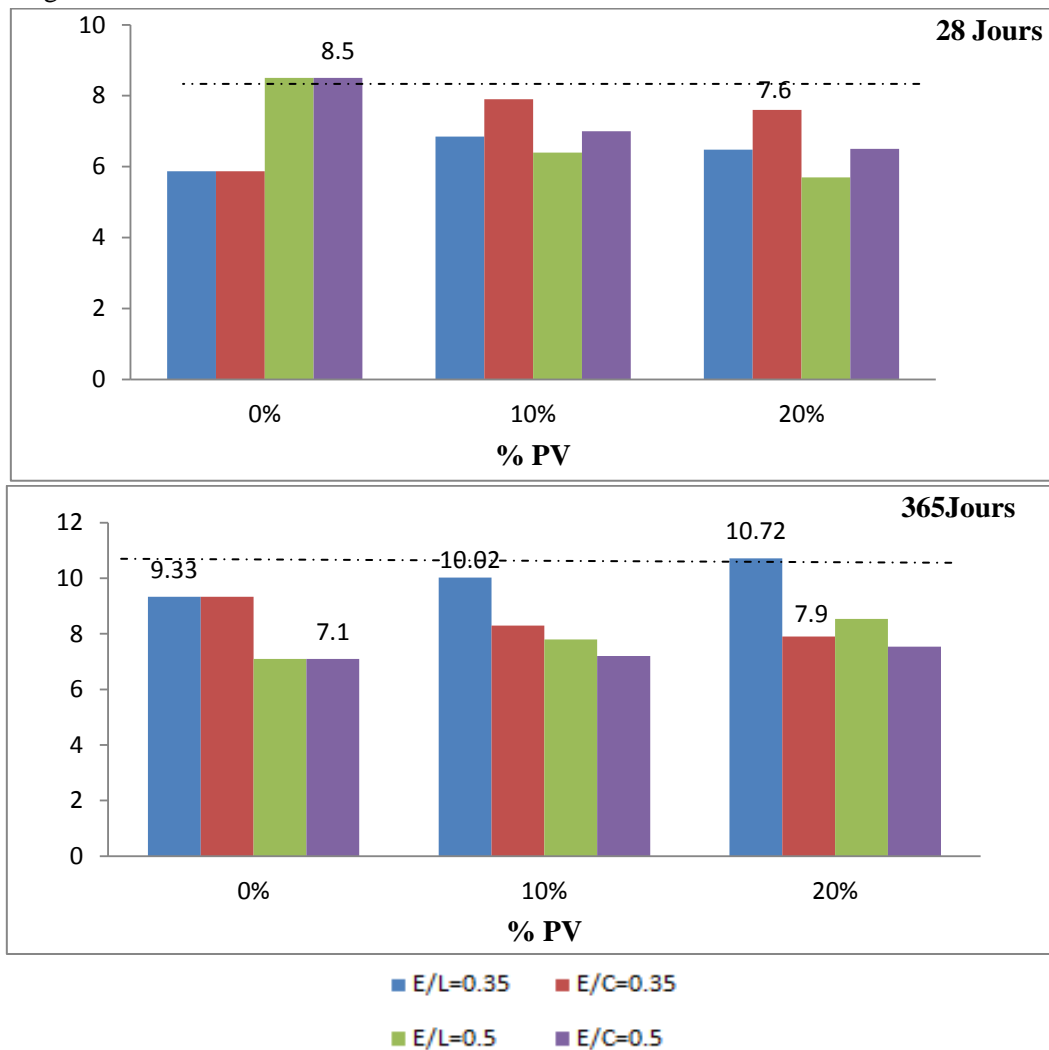


Figure 88. b. Effet des rapports E/L et E/C sur la résistance en flexion (MPa) en fonction du dosage en PV

On constate sur la figure 88. b ;qu'à l'âge de 28 jours, les mortiers sans PV avec le rapport E/L=0.5 offrent les meilleurs résultats de résistance à la flexion par rapport a tous les autres, avec la valeur maximale enregistrée de 8.5 MPa sur le graphe, contrairement aux mortiers avec 10 et 20 % de poudre de verre le rapport E/L et E/C=0.35 étaient meilleurs par rapport a ceux égale à 0.5, ce qui nous conduit a comprendre que excès d'eau absorbé par les grain de ciment CPA était nécessaire pour le mortier témoin pour développer ces performance mécanique en flexion, mais contrairement en présence de la poudre de verre cette quantité d'eau devrait être limité au rapport E/C = 0.35, ce qui nous conduit que les particules fines de verre vitreuses et fine n'absorbe pas beaucoup d'eau pour ce combiner avec la chaux et ainsi produire les CSH.

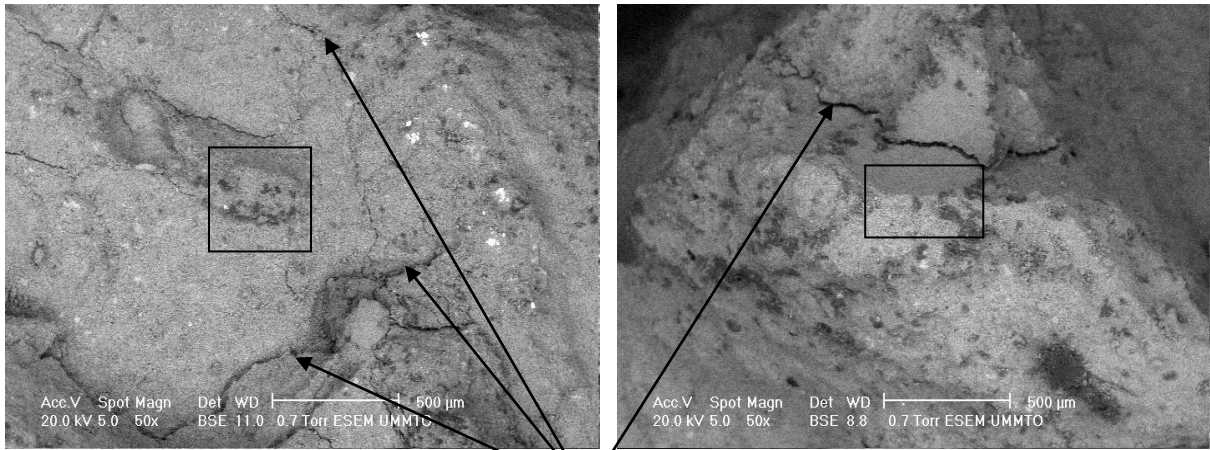
A 365 jours un autre comportement est enregistré pour les mortiers étudiés tels que à la résistance a la flexion avec substitution de 10 et 20 % de PV est supérieure a celle des mortiers sans PV et essentiellement pour le rapport E/L= 0.35 avec une valeur de 10.72MPa atteinte par M20PV, comparant a 28 jours on constate qu'une petite quantité d'eau interne est nécessaire pour améliorer la résistance de la poudre de verre mais reste limité au rapport 0.35.

Une augmentation logique de la résistance à la entre 28 et 365 jours est remarquée puisque les résultats ont évolué donc ce qui confirme le développement de la réaction poozolanique dans le temps, la réaction d'hydratation qui se manifeste entre le ciment CPA et un l'ajout cimentaire qui est la PV est plus lente.

Cependant pour le mortier avec le rapport E/L =0.5 une diminution de la résistance est enregistré de 1.4 MPa à 365 jours ce qui montre que la quantité d'eau qui a joué un rôle favorable a 28 jours avait affecté la résistance a long terme de ce mortier pour le fragiliser vis-à-vis de tous les autres.

2. 4. Etude de la microstructure interne avec MEB

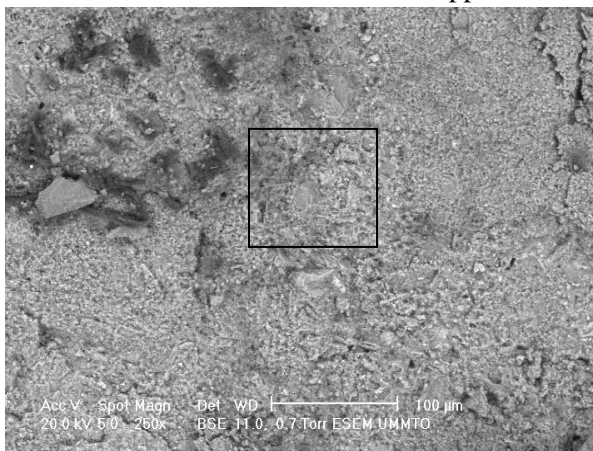
Il est important de noter que cette étude est purement comparative, nous présentons dans ce paragraphe des observations faites avec le MEB de la surface interne de nos échantillon mortiers après écrasement des spécimens en compression, à différents âges, 7, 28 et 90 jours. Les résultats obtenus sont présentés dans les Figures 89, 90 et 91, elles doivent être prises avec prudence, compte tenu de la méthode de préparation de l'échantillon et les défauts expérimentaux possibles. En effet, l'échantillon est polie afin d'obtenir une surface plus ou moins lisse et plate. Au cours de cette opération, il est possible de former un réseau de microfissures ou une séparation entre les granulats et la pâte de ciment. Cependant, on peut supposer que l'apparition de microfissures dans la pâte de ciment est principalement liée et les tensions produites sur les spécimens dont proviennent les échantillons. Nous avons choisi pour illustrer l'analyse globale que nous avons menée avec les images plus représentatives de l'état de la microstructure.



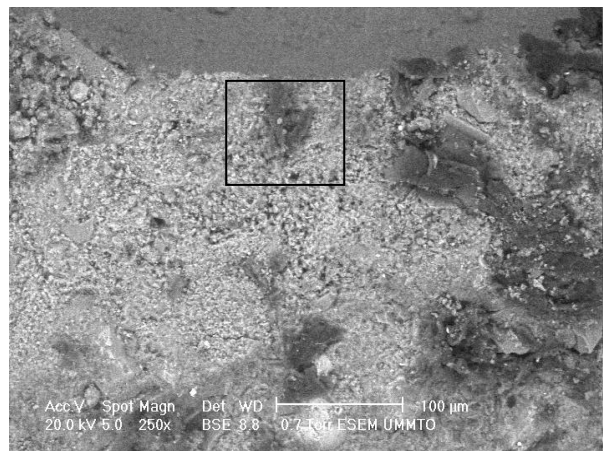
a- 0% PV (x50)

b- 20% PV (x50)

Apparition de fissures dues à l'écrasement

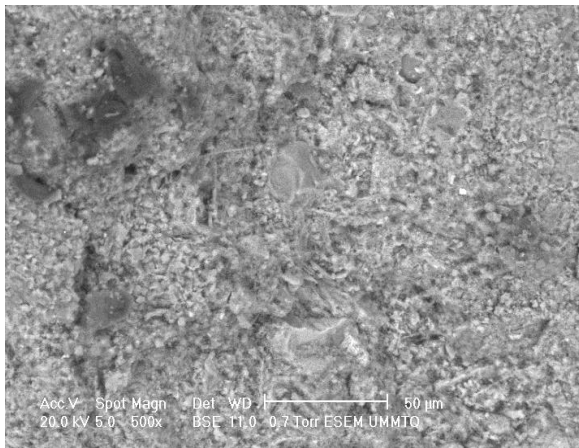


c- 0% PV (x250)

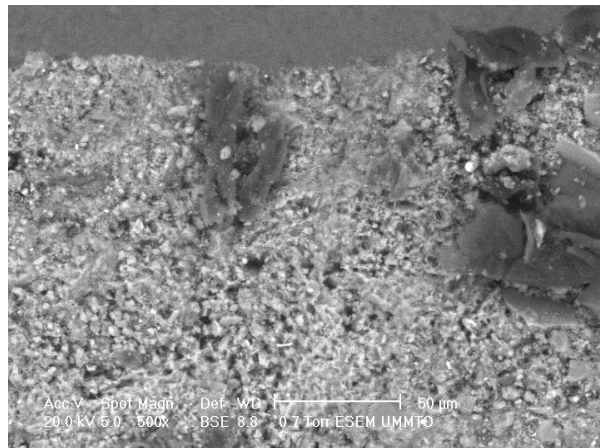


d- 20% PV (x250)

Structure plus développée

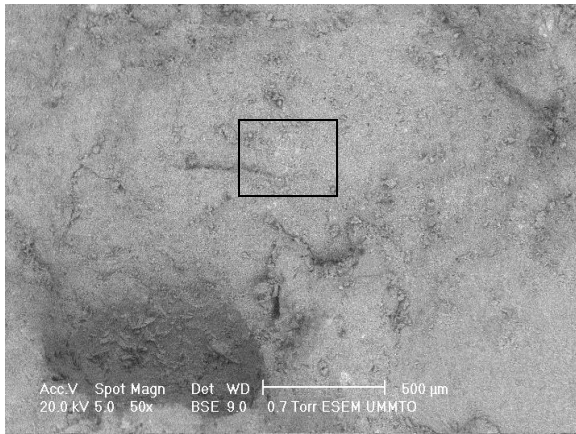


e- 0% PV (x500)

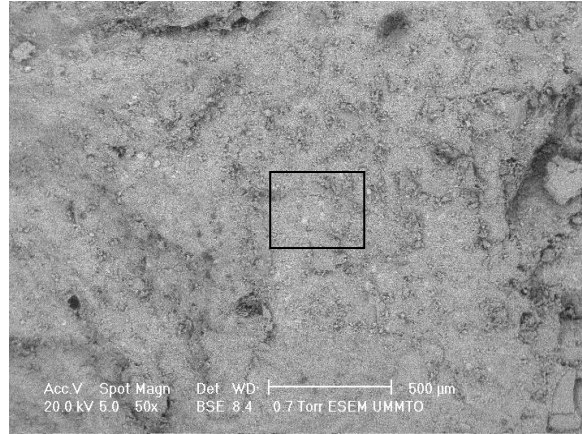


f- 20% PV (x500)

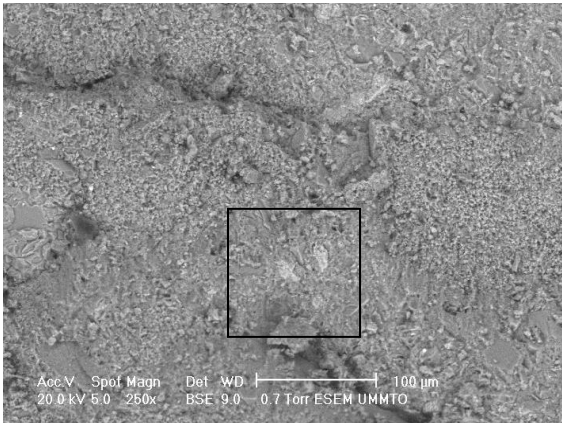
Figure 89. Image MEB des mortiers pour $E/L = 0.35$ à l'âge de 7 jours



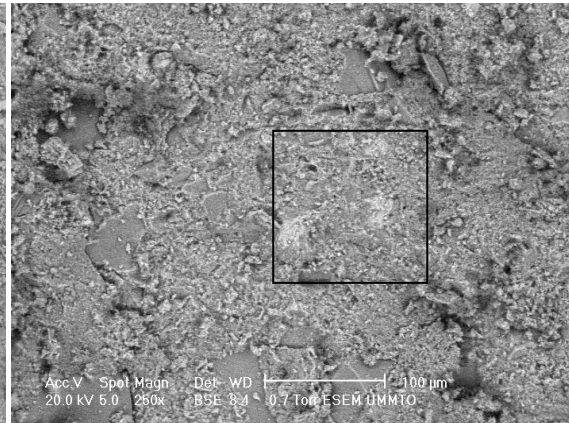
a- 0% PV (x50)



b- 20% PV (x50)

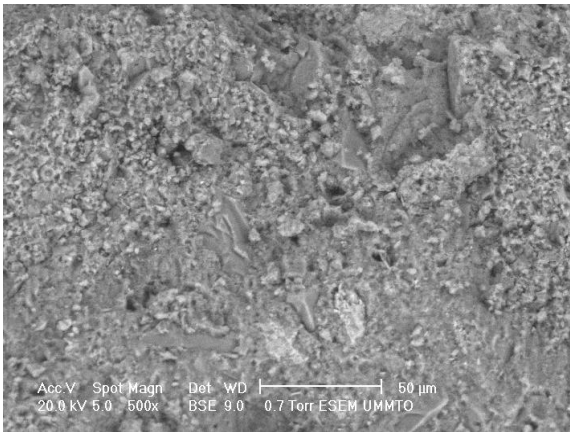


c- 0% PV (x250)

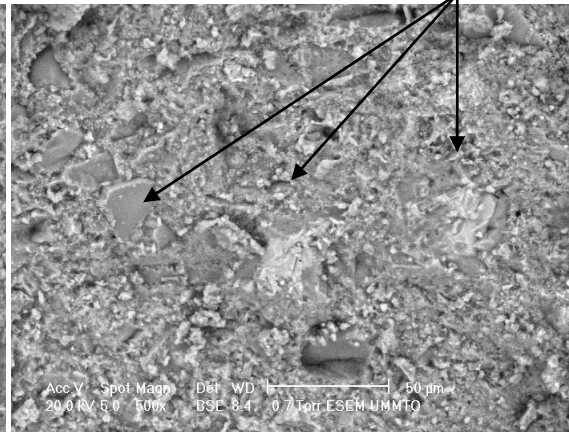


d- 20% PV (x250)

La taille des cristaux plus distincte



e- 0% PV (x500)



f- 20% PV (x500)

Figure 90. Image MEB des mortiers pour $E/L = 0.35$ à l'âge de 90 jours

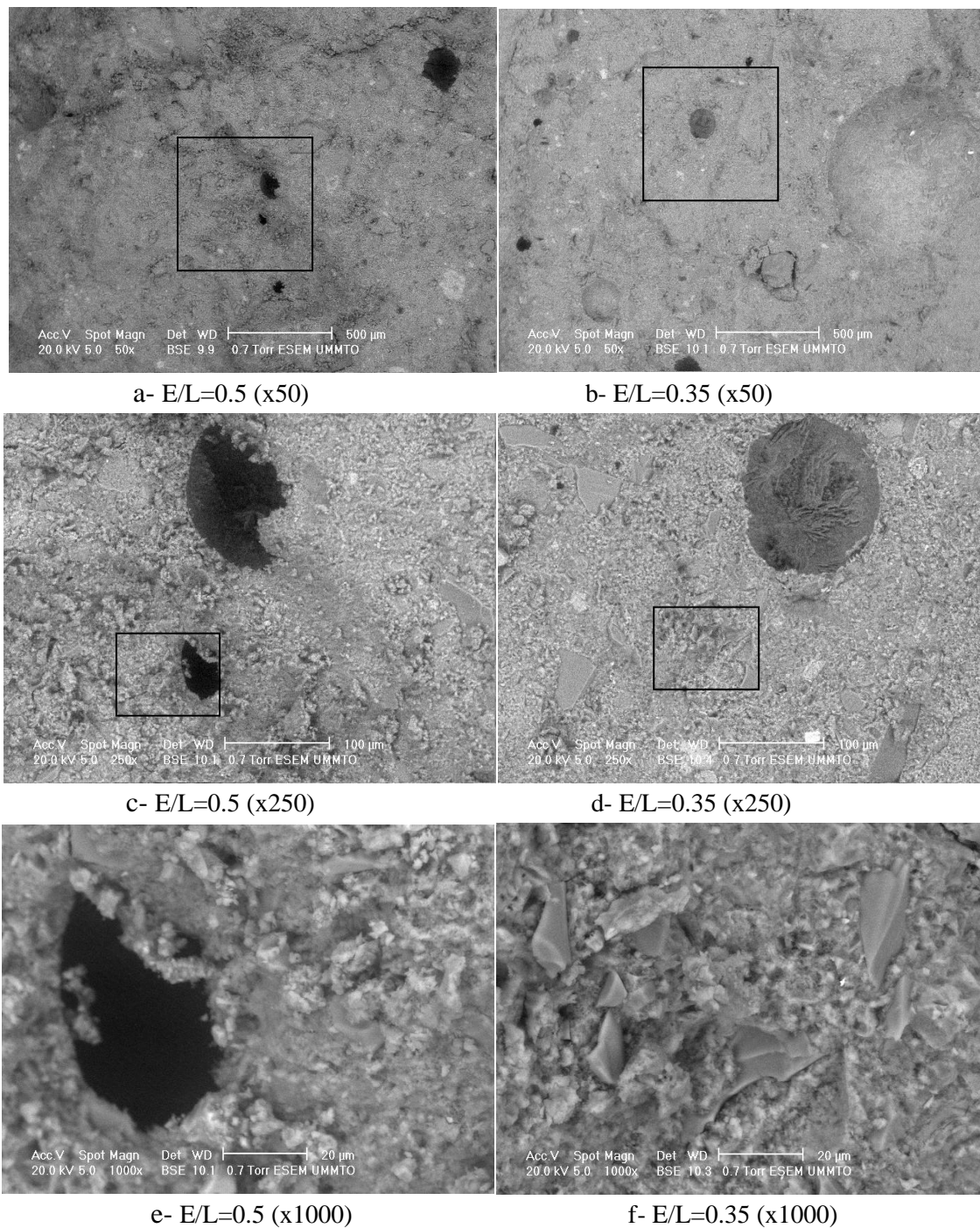


Figure 91. Image MEB du mortier avec 20% de poudre de verre à l'âge de 28 jours

Une analyse structurale des mortiers a montré que leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la présence de défauts de structure. Plusieurs types de défauts se différenciant par leur taille peuvent être observés dans ces échantillons.

A l'échelle la plus faible (x 50) on observe le défaut dit de microporosité du béton, il s'agit de pores, dits Capillaires (Figure 91 a et b), issus des espaces inter granulaires initialement présents dans la pâte fraîche. Leur taille varie entre 50 μ m et quelques μ m.

A l'échelle d'après (x1000) on observe une structure plus développée de la structure interne de ces mortiers sans et avec poudre de verre et pour cela trois effets étaient évalués :

Effet du rapport E/L	Effet de la poudre de verre	Effet de l'âge
Les échantillons de mortiers avec E/L=0.5 présentent une porosité importante qui se traduit par la présence de points noirs (air occlus) sur la figure III.17a, les aiguilles de portlandite sont nettement visible et formés pour le E/L=0.35 (figure III.17 f) que celle du rapport E/L=0.5 (figure III.17 e)	Pour les mortiers avec poudre de verre, une structure plus dense par rapport à celle sans poudre de verre (figure III.16 e et f), également les cristaux de portlandite sont bien composés avec des formes allongées (figure III.17 f), la taille de ceux observés avec poudre de verre est largement plus grande que celle sans poudre de verre.	A 7 jours on constate peu de différence entre les deux mortiers, aucune structure notable n'est visible, mais a 28 et 90 jours nous observons une structure plus dense pour le mortier à base de poudre de verre ou les cristaux et les aiguilles de portlandite sont plus développées par rapport au jeune âge surtout pour celui avec PV (figure III.15f et III.17f)

Conclusion:

L'objectif général de cette partie était d'évaluer l'effet de la substitution de ciment par de la (PV) à l'état frais et durci, essentiellement la résistance mécanique des mortiers MHP à base de ciment sans ajouts CPA en utilisant des rapports E/L et E/C fixés à 0,35 ensuite à 0.5 à titre de comparaison.

L'intérêt de l'approche est de permettre le recyclage du verre, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les premiers résultats présentés ici révèlent que les délais de prise sont légèrement augmentés par l'addition de poudre de verre au ciment CPA. L'utilisation de la PV réduit habituellement la demande d'eau. La consistance diminue avec la teneur en PV, suggérant un excès d'eau qui peut être expliqué par la différence de surface spécifique entre la PV et le ciment et par la plus faible absorption de l'eau de gâchage par la PV, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans la matrice cimentaire.

La poudre de verre, tout comme d'autres ajouts cimentaires classiques, modifie la cinétique de développement de la résistance à la compression des mortiers. Elle entraîne ainsi un développement lent de la résistance, qui à 28 jours est plus faible que celle des témoins sans PV. Cette observation peut s'expliquer par les modifications de l'hydratation de la matrice induites par la substitution de ciment par la PV qui absorbe moins d'eau que le ciment. En revanche, à 90 jours de prise, on observe que l'addition de 10 % ou 20 % de PV améliore la résistance à la compression.

La résistance à la flexion est quant à elle améliorée à 28 jours comme à 365 jours de prise. La poudre de verre exerce donc un effet physique et chimique (réaction pouzzolanique et alcali silice).

L'utilisation du ciment CPA type CEM I 52,5 a significativement augmenté la résistance à la compression comparativement au ciment CPA 42,5 utilisé par d'autres auteurs tel [61].

Le rapport E/L affecte significativement la résistance du mortier à base de CPA, les résultats présentés ici montrent que le rapport E/L = 0,35 donne de meilleurs résultats que le rapport E/C = 0,35. La poudre de verre dans notre cas a été faite en substitution du ciment CPA et non en ajout comme dans les travaux de [26].

La valorisation de poudre de verre comme substitut partiel au ciment dans les mortiers d'usage courant semble réalisable.

Chapitre 8

Résultats d'essais sur BHP

Les résultats présentés dans ce chapitre caractérisent les propriétés physique à l'état frais et les propriétés mécaniques des bétons à haute performance BHP étudiés à savoir ; résistance mécanique en compression et leur évolution dans le temps (7, 28, 90, et 365 jours), résistance à la flexion, propagation d'onde ultrasonore ainsi qu'un contrôle de la microstructure interne des échantillons afin de visualiser en œil vif et microscopique la répartition des granulats dans l'ensemble du béton et confirmer l'homogénéité des mélanges adoptés.

1. Caractérisation a l'état frais (Affaissement et masse volumique)

Les valeurs de l'affaissement et de la masse volumique (kg/m³) pour les bétons incorporant de la poudre de verre sont présentées au tableau 20.

Tableau 20. Propriétés à l'état frais des Bétons à haute performance et bétons ordinaires

Après 10 min	BHPR	BHPL1	BHPL2	BHPL3	BHPC1	BHPC2
Affaissement (mm)	40	50	70	80	30	25
Masse volumique (kg/m ³)	2560.2	2531.5	2478.8	1345.7	2545.8	2493.2
Après 10 min	BOR	BOL1	BOL2	BOL3	BOC1	BOC2
Affaissement (mm)	165	185	192	203	151	120

Concernant la masse volumique, elle est relativement moins élevée pour les bétons substitués de la PV par rapport au béton de référence, elle diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de PV. Chose essentiellement due à la différence de finesse puisque la masse volumique de la PV est inférieure à celle du ciment qu'on a substitué (chapitre 4), il en résulte une amélioration de la masse volumique du béton frais.

L'affaissement donne une indication sur la maniabilité des bétons. Une bonne maniabilité assure une bonne mise en œuvre. La figure 92 montre la variation de l'affaissement pour le béton ordinaire et le béton à haute performance en travaillant avec les deux rapports E/L et E/C.

On voit que l'utilisation de 2 % de superplastifiant de la masse de ciment pour le BHP donne un béton ferme (BHPC1 et BHPC2) et un béton plastique (BHPR, BHPL1, BHPL2, BHPL3), mais l'utilisation de 1,5 % de superplastifiant de la masse de ciment pour le béton ordinaire donne un béton mou (BOC2) à fluide (BOR, BOL1, BOL2, BOL3, BOC1). Le comportement rhéologique des deux bétons a changé d'un comportement plastique à un comportement fluide. Plus le rapport E/L est réduit plus le béton est moins visqueux et nécessite la vibration. La fluidité de béton est augmentée avec l'utilisation de la poudre de verre, en raison de leurs petites particules sphériques et de leur grande surface

spécifique qui peuvent combler l'espace entre les grains de ciment au lieu qu'il soit occupé par l'eau et cause généralement une réduction de la quantité d'eau exigée pour le béton maniable.

On remarque une augmentation de l'ouvrabilité de tous les bétons avec l'augmentation du pourcentage de poudre de verre pour les deux rapports E/L soit de 0.35 soit de 0.5. Cela est dû d'une part à la substitution de la partie ciment par la poudre de verre, c'est à dire à une variation de finesse par rapport au BHPR et BOR, ainsi le substituant utilisé est finement broyé donc il remplit les pores et libère l'eau emprisonnée puisque on n'a pas fait varier le rapport E/C.

Néanmoins il est clair que l'affaissement des trois bétons ordinaires (BOR, BOL1, BOL2) formés avec un dosage de 400 kg/m³ et un E/L égale à 0.5 est supérieure à ceux des bétons à haute performance formés avec un dosage plus grand et moins de quantité d'eau, réflexion faite que la poudre de verre avec la finesse utilisée a peu de demande en eau. Également on peut largement classer les BHPR, BHP10 et BHP20 dans la gamme des bétons fermes et les bétons ordinaires comme étant des bétons très plastiques vu les résultats de la Figure 92.

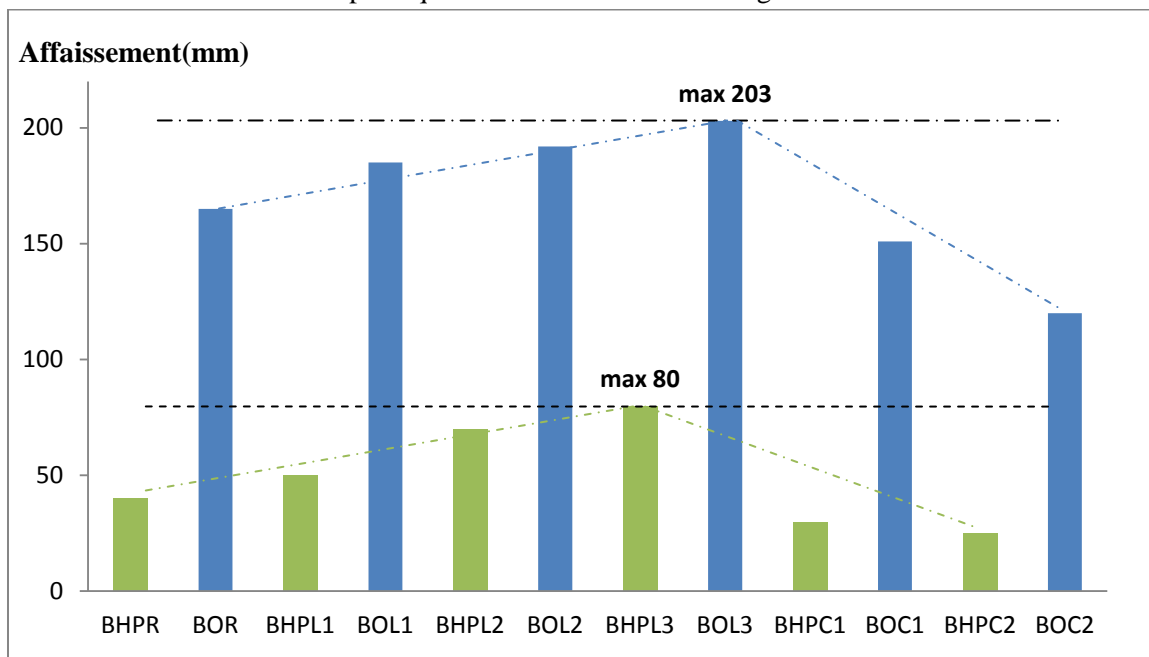


Figure 92. Evolution de l'affaissement

2. Caractérisation à l'état durci

On se propose dans ce paragraphe d'étudier la résistance mécanique en compression, flexion, dans le but de mettre en évidence la contribution de la poudre de verre à l'amélioration des propriétés mécaniques. À cet effet, une comparaison a été réalisée pour la même classe de résistance entre les propriétés des bétons BHP de référence et celles des bétons avec poudre de verre. Les résultats obtenus ont permis de tracer l'évolution de la cinétique de durcissement des BHP et BAP en fonction des dosages de cette poudre de verre.

2. 1. Evolution des résistances mécaniques en compression

La résistance à la compression est une caractéristique essentielle des bétons et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Cette résistance mécanique a été mesurée à différentes échéances. Elle représente la moyenne des résistances d'une série de trois éprouvettes de (11x22) cm pour les BHP soumises à l'écrasement.

❖ Béton a haute performance BHP

La cinétique de développement des résistances des différents BHP en fonction du dosage de poudre de verre est présentée sur la figure 93.

Une analyse plus détaillée permet de mieux comprendre l'effet de la poudre de verre finement broyée sur la résistance en compression des bétons. L'avancement de la réaction pouzzolanique de la PV en fonction du temps peut être divisé en deux périodes, une période inférieure à 28 jours et une autre supérieure. La figure III.19 montre le développement de la résistance en compression des mélanges BHP de rapport E/L=0,35 et E/C= 0.35 jusqu'à l'âge de 365 jours.

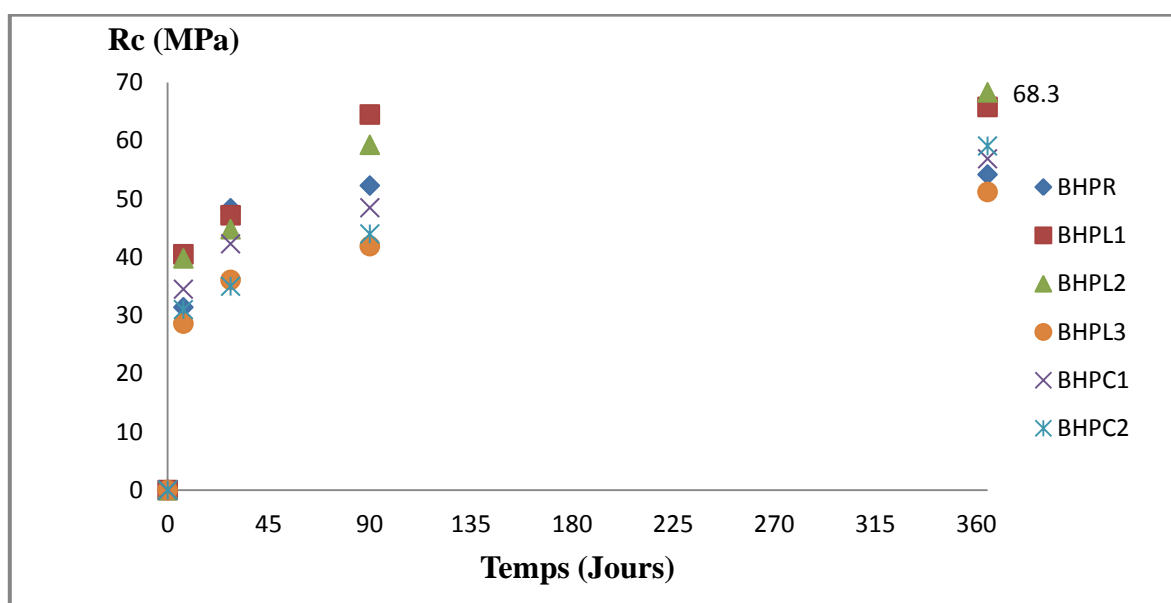


Figure 93. Evolution du durcissement en fonction du % de poudre de verre des BHP

Jusqu'à l'âge de 28 jours, les résistances en compression des bétons avec PV sont inférieures à celle du béton témoin BHPR. Avec l'âge de la réaction pouzzolanique, les bétons engendrent des gains de résistance significative. Au delà de 28 jours la résistance en compression du béton BHPL2 atteint 64,5 MPa à 90 jours, au moment où le béton témoin BHPR affiche une valeur de 52,3 MPa, soit de 12.2 MPa supérieur à celle du béton témoin.

En effet à 365 jours, les bétons à 10 et 20% de PV développent un gain de résistance qui vari de 3 à 12 MPa par rapport au mortier témoin, par exemple la résistance du BHPL2 était de 44,3 MPa à 28 jours et elle a augmenté pour atteindre 59.3 MPa à 90 jours et même atteindre les 68.3 MPa a 365 jours, d'où on peut constater qu'à l'âge de 365 jours toutes les résistances sont supérieures a celle du BHPR sauf que pour le béton BHPL3 avec 30% de PV qui reste légèrement inférieure.

La PV améliore les résistances mécaniques par effet de remplissage, par effet de surface et par effet chimique ou pouzzolanique lorsqu'elles sont réactives, améliore les résistances à plus longues échéances par effet chimique (hydraulique ou pouzzolanique) [26, 72]. L'augmentation du dosage en PV entraîne une amélioration des résistances mécaniques à tous les âges (Figure 93). Ce phénomène est dû à l'effet du remplissage qui améliore la compacité et à l'effet de surface qui entraîne une meilleure hydratation du ciment au jeune âge. Les résultats obtenus sont conformes aux références bibliographiques citées dans ce paragraphe.

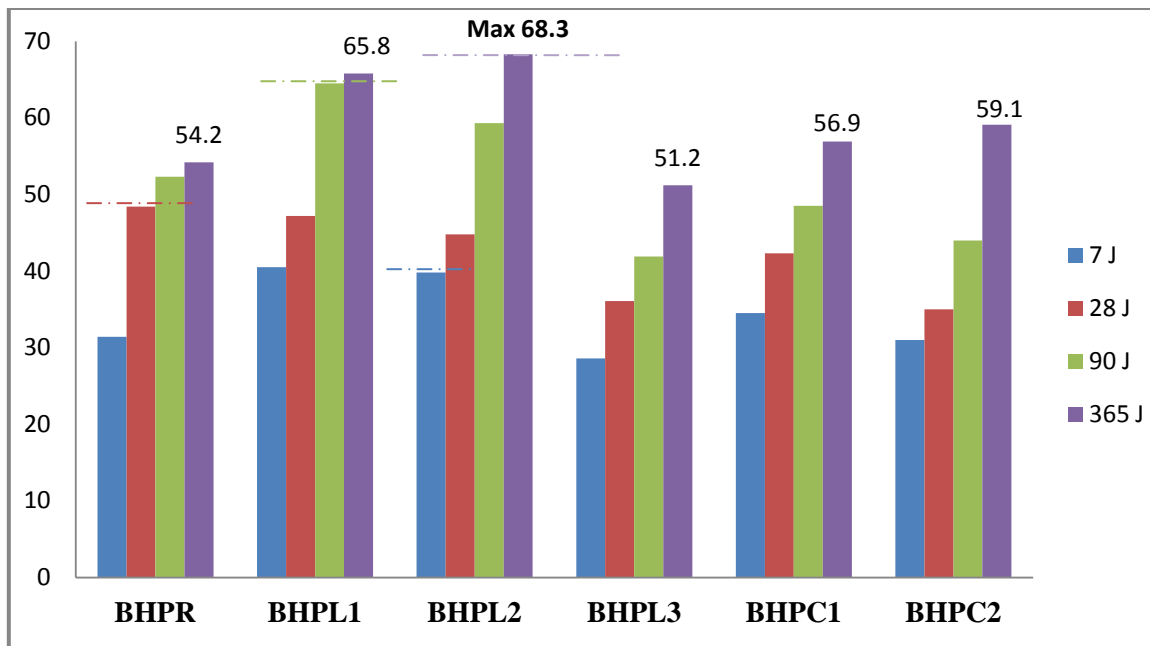


Figure 94. Influence du dosage en poudre de verre sur la résistance à la compression (MPa) des BHP à différent âges

La réaction pouzzolanique de la PV est plus lente au début mais a tendance à se développer plus tard dans le temps comme le montre la figure 94. Cette tendance peut être observée dans les bétons avec le rapport E/L=0,35 et E/C= 0.35. Ces résultats sont en accord avec les études antérieures où il est remarqué que les résistances des bétons ordinaires incorporant la poudre de verre se développent dans le temps [72, 97, 47].

Les résultats de résistance à la compression à 365 jours suggèrent donc qu'un dosage de 20% de PV donne les meilleurs résultats obtenus (68,3 MPa) dans les conditions expérimentales testées avec ciment sans ajouts de classe CPA 52,5 en travaillant avec le rapport E/L ou le L représente dans notre cas ciment + poudre de verre. D'autres auteurs [61] ont obtenu des résistances à la compression de 37 MPa pour 20% de PV avec un ciment de classe CPA 42.5. L'effet de la PV dépend donc de la classe de ciment auquel on la substitue. [104] a révélé dans ces travaux également que au delà de 20 % de remplacement par la PV la résistance des bétons à ultra hautes performance fibrés diminue avec un dosage en ciment de 1000 kg/m³, ou il a pu atteindre une résistance avoisinant les 200 MPa à l'âge de 90 jours.

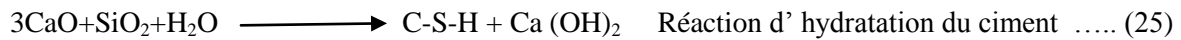
Pour l'effet du rapport, les bétons formulés avec le rapport E/L ont des résistances en compression plus élevés que celles des bétons formulés avec le rapport E/C. Le plus grand écart de la résistance est de 9 MPa enregistré pour le béton avec 20% de poudre de verre.

L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/C en s'opposant à la floculation des grains de ciment, donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue.

Le rapport E/L réduit signifie que la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment, les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire, la perméabilité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées, ce qui améliore la durabilité.

Puisque sa teneur élevée en silice amorphe SiO₂ lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec de la chaux contenant dans le ciment pour produire d'autres hydrates tel que en présence d'eau associée à la température libérée par l'hydratation du C₂S et du C₃S du ciment Portland

ils se combinent pour former des liants hydrauliques :les silicates de calcium hydratés (C-S-H) semblable à celles formées pendant l'hydratation du ciment Portland. [54]



Se référant aux deux réactions précédentes, il est claire que la réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium ou de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former du silicate de calcium hydraté (C-S-H). Nous avons pris le soin de conserver les éprouvettes dans l'eau car à température ambiante, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines, le but essentiel de notre recherche pour récolter les résultats après 365 jours de conservation. Cependant selon les recherches de Shao [67], plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus elle réagit rapidement avec la chaux et sa demande en eau est fonction de sa finesse.



Figure 95. Influence du dosage en poudre de verre sur le gain en résistance à la compression (MPa) des BHP à différent âges

Le gain de résistance en compression pour les bétons incorporant de la poudre de verre est illustré dans la figure 95. Le gain de résistance en compression est défini comme la différence entre la résistance en compression à un âge donné et celle obtenue à l'âge de 28 jours. Les gains de résistance en compression à 90 et 365 jours des bétons incorporant de la PV sont supérieurs à celui du témoin. Tous les bétons incorporant de la PV entraînent des gains de résistance très significatifs à l'âge de 90 jours, il semble que le gain de résistance en compression est proportionnel avec le taux d'incorporation de la poudre de verre dans le béton sauf pour le 30%. Le béton incorporant 20% de la PV, le BHPL2 affiche le gain de la résistance en compression le plus important à 365 jours, un comportement similaire obtenu dans les travaux de recherche de [15, 52].

→ **Effet du rapport E/L =0.5 (Béton ordinaire BO)**

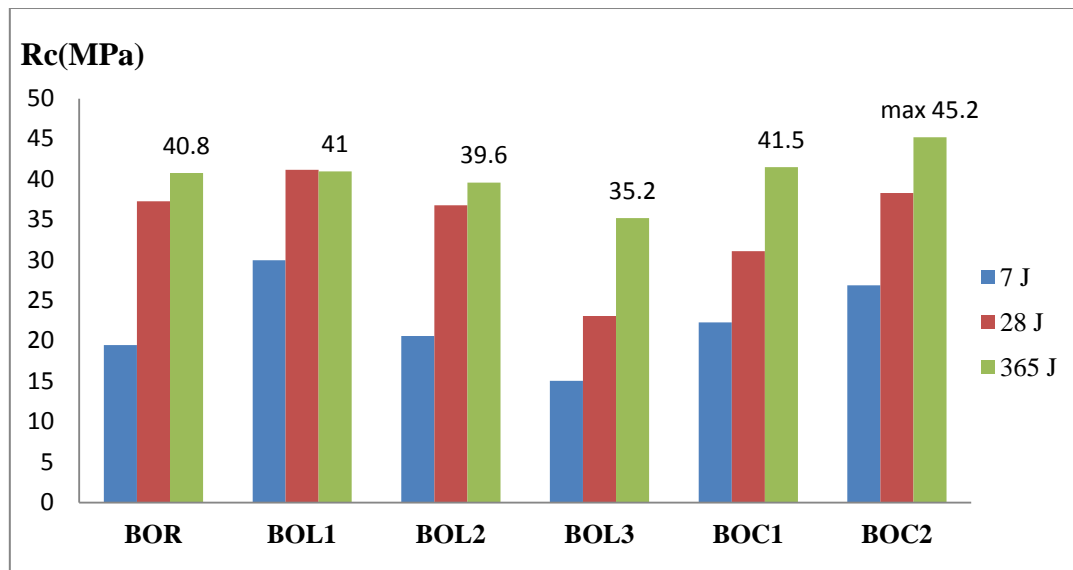


Figure 96. Influence du dosage en poudre de verre sur la résistance à la compression (MPa) des Bétons ordinaires BO à différent âges

On constate sur la figure 96 que dès jeune âge les bétons ordinaire avec poudre de verre développent des résistances plus élevées que celle du béton témoin sans poudre de verre, cette résistance suit ce même comportement jusqu'à 365 jours sauf pour le béton avec 30 % de poudre de verre ou sa résistance reste toujours inférieure à celle du béton ordinaire témoin.

Les études menées à l'université de Sherbrooke par [47, 83, 64] ont révélé que la poudre de verre performe mieux dans des bétons de rapports E/L élevés comparativement à ceux de rapports E/L faibles. En effet, lorsqu'un même taux de poudre de verre est incorporé dans des bétons de rapports E/L différents, notamment E/L = 0,55 et E/L = 0,40 avec des dosages en liant respectifs de 350 kg/m³ et de 400 kg/m³; une pénétrabilité des ions chlorure similaire dans les deux cas est observée suggérant une bonne durabilité de ce type de béton même à des rapports E/L élevés.

Mais un comportement non similaire est observé pour cette partie avec le rapport E/L= 0.5 tel que: les bétons ayant donnés les meilleurs résultats sont ceux formuler avec le rapport E/C=0.5 qui dépassent légèrement les résultats obtenus avec le rapport E/L=0.5, notant encore par rapport a la quantité d'eau de gâchage utilisée il y'a une approche entre le BOC1, BOC2 et les deux BHPL1 et BHPL2. La divergence des résultats obtenus avec ceux de l'université de Sherbrooke peut donc être lié à plusieurs paramètres tels que : le dosage en ciment, le type du ciment et sa finesse, la finesse de la poudre de verre le diamètre des plus grandes particules et sa composition chimique, ainsi qu'un facteur très modérant la nature du superplastifiant utilisé adapté au climat très froid de la région.

On comparant les résultats de la figure 94 et 96 on constate qu'une résistance de 68.3 MPa est atteinte pour les bétons à hautes performances BHP mais par contre une résistance de 45.2 MPa pour les bétons ordinaire BO, soit un gain de 21 MPa on réduisant la quantité d'eau de gâchage.

[70] dans ces travaux a constaté que la réactivité de la PV est plus accentuée et plus développée dans le temps en présence d'un environnement humide à fort dosage en eau, un point élaboré dans notre recherche en conservant les éprouvettes dans un bassin d'eau.

En termes de performance mécanique, les meilleurs résultats sont obtenus pour les BHP formulés avec le rapport E/L et pour les BO formulés avec le rapport E/C.

Les résultats de résistance à la compression à 365 jours suggèrent donc qu'un dosage de 20% de PV donne les meilleurs résultats obtenus (68,3 MPa) dans les conditions expérimentales testées avec

ciment sans ajouts de classe CEM I 52,5 en travaillant avec le rapport E/L ou le L représente dans notre cas C+ PV.

Pour l'effet du rapport, les bétons formulés avec le rapport E/L=0.35 ont des résistances en compression plus élevées que celles des bétons formulés avec le rapport E/L= 0.5. Le plus grand écart de la résistance est de 24 MPa enregistré entre BHPL2 et BOC2.

L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/L en s'opposant à la floculation des grains de ciment, donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue.

Le faible rapport E/L= 0.35 signifie que la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment, les grains de ciment sont très près les uns des autres, l'eau réagira avec les grains de ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire, la perméabilité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées, ce qui améliore la durabilité à l'âge de 365 jours.

2. 2. Evolution des résistances mécaniques en traction par flexion

La relation réglementaire (règle BAEL A.2.1, p12) qui lie la résistance caractéristique à la traction f_{tj} à j jours du béton et sa résistance caractéristique en compression f_{cj} , dans laquelle et sont exprimés en MPa (ou N/mm²). Cette formule est valable pour les valeurs de f_{cj} sont inférieures à 60 MPa s'écrit:

$$F_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad \dots\dots (27)$$

Une prédiction précise de la résistance à la traction du béton aidera à atténuer les problèmes de fissuration, à améliorer la prédiction de la résistance au cisaillement et à minimiser la rupture du béton. Lorsqu'il est nécessaire de contrôler la valeur de la résistance à la traction F_{ct} , on peut en faire la mesure de manière indirecte selon les règles d'Eurocode 2 (page 34 et 35) soit :

- Essai de flexion pure.
- Essai de fendage.

Ces deux essais sont plus faciles à réaliser que l'essai de traction directe. Assez souvent, une bonne résistance en compression implique de meilleures propriétés mécaniques tels que, la résistance en traction, la résistance en flexion.

❖ Essai de traction par flexion:

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28) cm³. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion (figure 61) et est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture. On note alors la valeur de résistance à la flexion affichée directement sur l'écran de contrôle. Résultats présentés sur la Figure III. 23 et les valeurs obtenues représentent la moyenne de deux cylindres testés pour chaque béton à chaque échéance.

Les résultats de la résistance à la flexion pour les bétons en fonction du temps sont donnés par les courbes de la figure 97, de ces résultats, on peut voir que la résistance à la flexion augmente avec l'âge pour tous les bétons BHP, à un jeune âge (28 jours) la résistance du BHPR témoin sans poudre de verre est supérieure à celle de tous autres formulés avec le rapport E/L =0.35 ou E/C =0.35.

Mais au-delà de cet âge à 90 jours, celle des bétons à base de verre augmente progressivement et dépassent la résistance du BHPR qui confirme le résultat émis pour la résistance à la compression (Figure 93), que la poudre de verre exerce un effet physique et chimique (réactions pouzzolanique et alcaline-silice). Une augmentation considérable de la résistance à la flexion entre 28 et 90 jours est observée, elle augmente avec l'augmentation de la teneur en PV dans les BHP. Étonnamment à 365 jours, la résistance à la flexion diminue pour tous les BHP avec et sans PV contrairement au comportement de ces mêmes bétons en compression, phénomène pouvant s'expliquer par la faible

adhérence entre les grains du ciment et du sable due à la réaction alcali-silice et après exténuation de la réaction d'hydratation du ciment CPA.

Néanmoins à l'âge de 365 jours la résistance du béton avec 10 % de PV reste supérieure à celle du béton témoin de 1.7 MPa et les autres restent inférieures mais à des valeurs très proches ne dépassant pas les 0.7 MPa.

Pour l'effet du rapport E/L et E/C les résultats se divergent donc peut de différence peut être distinguée.

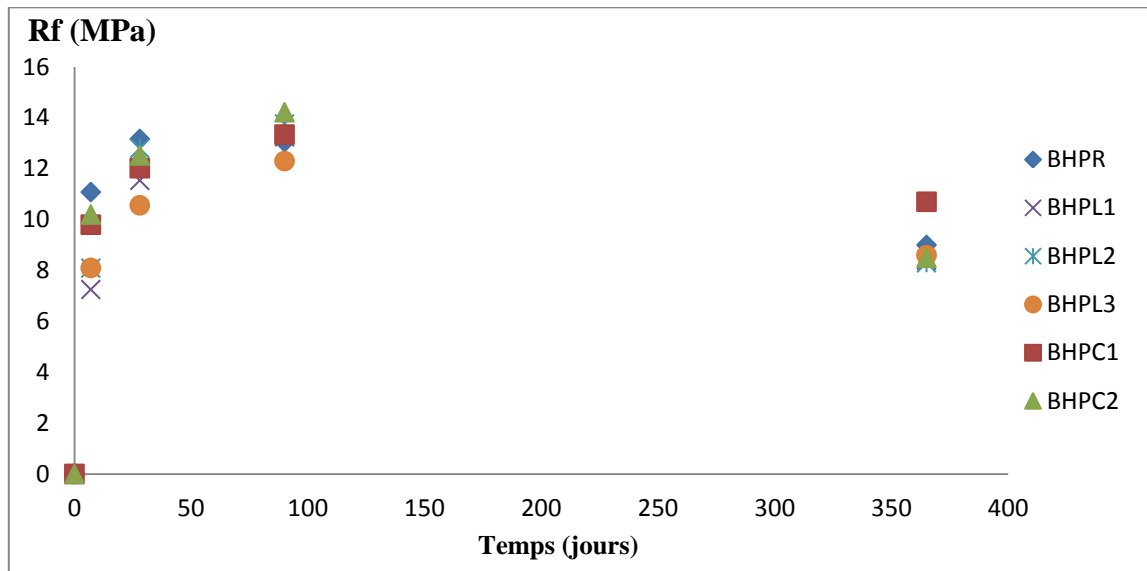


Figure 97. Evolution de la résistance à la flexion dans le temps en fonction du % de poudre de verre des BHP

On peut conclure de la Figure 98 que les particules ultra fines de la PV, qui consistent principalement en silice amorphe (SiO_2) augmentent la résistance à la flexion des BHP par des actions pouzzolaniques et physiques dès jeune âge d'après [52, 3], mais les résultats évalués de cette résistance dans la littérature n'étaient soit qu'un jeune âge ou en présence d'autre fine essentiellement la fumée de silice qui possède la tendance à augmenter la résistance en flexion à 28 jours [83], jusqu'alors reconnue comme jouant le mieux ce rôle est la plus efficace (ajout actif) grâce à sa finesse très élevée. Elle permet de combler les minuscules vides dans la zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie, elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton.

La cinétique de montée en résistance notée est rapide à 28 jours, ceci résulte du dosage en ciment élevé de $450\text{Kg} / \text{m}^3$ (finesse de mouture et la teneur en aluminates), la teneur en retardateur de prise, ainsi que, bien sur, de la température du béton.

Cela peut être expliqué par le double rôle de la PV : il y a d'abord l'effet pouzzolanique correspondant à l'association partielle ou totale des fines avec l'eau et la chaux libérée par l'hydratation du ciment. La PV fixe la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en une combinaison peu soluble, ensuite il y a l'effet filler (ou de remplissage) caractérisé par une mouture poussée qui facilite leur pénétration entre les grains de ciment et la diminution du rapport E/L.

Au final la substitution de ciment CPA par PV modifie plusieurs paramètres dont les effets s'opposent comme le montre la perte de résistance en flexion à 365 jours estimée au minimum de 3 MPa par rapport à l'âge de 90 jours. D'une part, la PV contient de la silice qui est reconnu pour accélérer l'hydratation des silicates par consommation de la chaux issue de l'hydratation du $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$. Par ailleurs, l'utilisation de superplastifiant à haut dosage (2%), comme c'est le cas pour les BHP, est

supposée apporter une meilleure dispersion des fines et permettre une hydratation plus précoce des silicates du ciment au jeune âge. D'autre part, la présence de chaux entraîne la mobilisation d'ions Ca^{2+} et OH^- en solution d'autant que le processus d'hydratation de la chaux vive en chaux éteinte passe également par une sursaturation de la solution en ions Ca^{2+} , ce qui tend à limiter la dissolution des silicates et donc leur hydratation [96].

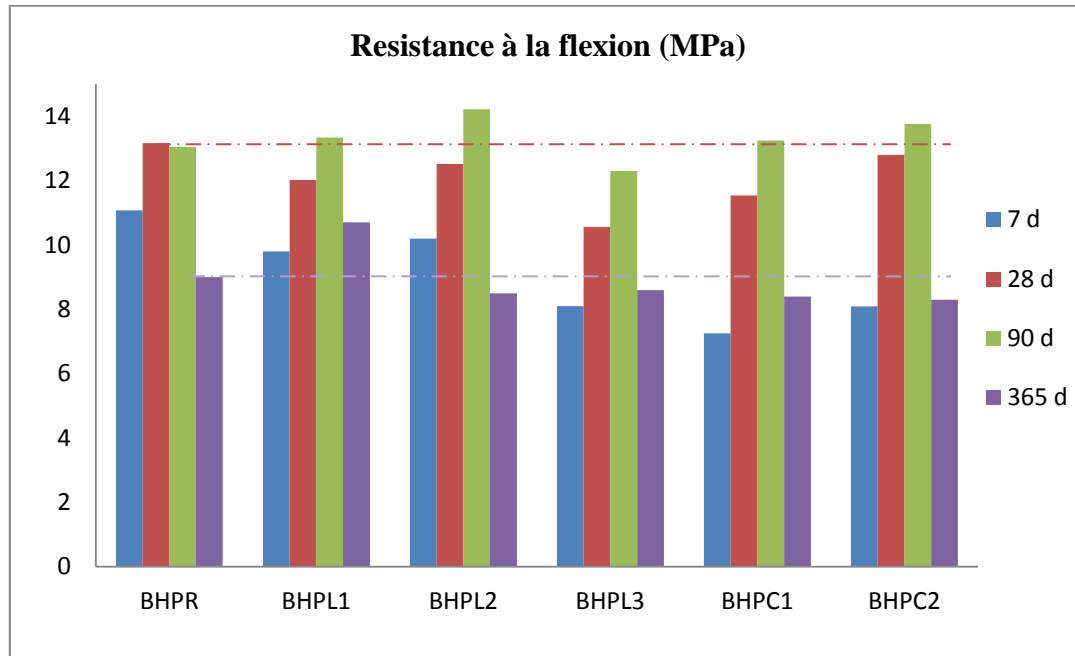


Figure 98. Influence du dosage en poudre de verre sur la résistance à la flexion des BHP à différents âges

2. 3. Evolution de la vitesse à ultrason

L'essai de la vitesse des ondes ultrasoniques (VU) comportent fondamentalement la mesure de la vitesse de l'onde électronique à travers le béton. Cet essai est utilisé pour diagnostiquer la qualité du béton dans la limite de l'uniformité, la détermination de la fissuration, la résistance, l'estimation et l'évaluation de la détérioration du béton.

Le but de son utilisation dans la présente étude était de pouvoir utiliser les mesures de VU pour prévoir la qualité et la durabilité des bétons substitués à différents pourcentages de poudre de verre à différentes échéances, principalement de pouvoir établir par la suite les relations entre la VU, le taux de substitution de la PV, la masse volumique, les résistance à la compression obtenues.

Les résultats des mesures de la résistance à la compression et de la VU sont listés dans le Tableau 21. Concernant la masse volumique on note qu'à l'âge de 28 jours la masse volumique du BHPR dépasse celle des autres BHP, ce qui traduit qu'elle diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution de la PV, un comportement similaire de la masse volumique à l'état frais est observé.

A l'âge de 365 jours on constate que la masse volumique a baissé par rapport à l'âge de 28 jours pour tous les BHP, mais contrairement le béton BHPL1 et BHPL2 sont plus dense que le BHPR, cela ne peut être expliqué que par le rôle filler de la poudre de verre ayant une finesse plus élevée que le ciment CPA pour remplir les vides.

Tableau 21. Résultats des mesures de la masse volumique, résistance à la compression et de la vitesse à l'ultrason VU.

	BHPR	BHPL1	BHPL2	BHPL3	BHPC1	BHPC2	
La masse volumique (Kg/m³)	2555.4	2550.6	2541.0	2532.3	2545.8	2550.6	28 jours
La résistance à la compression (MPa)	48.4	47.2	44.8	36.1	42.3	35	
La vitesse VU (m/s)	4810	4808	4790	4188	4768	4065	
La masse volumique (Kg/m³)	2507.28	2543.73	2500	2456.82	2551.02	2470.84	365 jours
La résistance à la compression (MPa)	54.2	65.8	68.3	51.2	56.9	59.1	
La vitesse VU (m/s)	4930	5250	5360	4911	5087	5120	

2. 3. 1. Effet du pourcentage de la poudre de verre sur les BHP

La Figure 99 montre l'effet de la substitution du ciment CPA par la poudre de verre en fonction du temps de durcissement à l'âge de 28 et 365 jours sur l'évolution de la vitesse des ondes ultrasoniques. Les valeurs indiquent que, comme prévu, la VU augmente avec l'augmentation du temps de durcissement. À 28 jours le BHPR sans PV semble avoir être de meilleure qualité avec une VU=4810m/s, dépassant ainsi de 2 m/s et 20 m/s les deux BHPL1 et BHPL2 respectivement, par contre le béton de moindre qualité est le BHPC2 avec une VU=4065m/s comme le montre le tableau 21 et la figure 99, d'où le remplacement d'une quantité du ciment par la PV a affecté la qualité du BHP produit tel que la VU diminue en augmentant la pourcentage de la PV.

A l'âge de 365 jours la VU de tous les BHP sans exception a augmenté par rapport à 28jours, mais la plus grande vitesse a été atteinte par le BHPL2 avec une VU=5360 m/s suivi de BHPL1, BHPC2, BHPC1, BHPR et enfin le BHPL3 de moins qualité que tous les autres. Il est clair que la PV a amélioré la qualité des BHP à long terme tel que la VU des BHP avec PV est supérieure à celui du BHPR sans PV.

Cette différence entre les VU peut être expliquée par le fait qu'il existe une relation inverse entre le volume des pores et de VU. Le volume des pores capillaires dans la pâte de ciment hydraulique diminue avec le temps, puisque le degré d'hydratation du ciment dépend de la durée d'hydratation en plus d'autres conditions tel que la température ambiante par exemple.

Notons également que plus la VU augmente plus le béton est dense et de meilleur qualité d'après la littérature, cependant l'ensemble des BHP a 365 jours rentre dans la gamme d'excellente qualité puisque la VU dépasse les 4500m/s selon le chercheur Whitehurst et Malhotra [99, 105]. (BHP très compacts avec de bonnes caractéristiques mécaniques).

On remarque que les valeurs obtenus sont proches de celles données en littérature pour un béton résistant dense et de bonne qualité, ces valeurs qui dépassent les 5000m/s sont relativement élevées et la raison pour la quelle l'augmentation des VU peut être lié à plusieurs facteurs comme l'a montré [106 et 107]: la première est au mode d'utilisation de la transmission directe méthode pour mesurer la VU, Al-Akhras cité par [107] a indiqué qu'en utilisant la transmission indirecte la méthode de mesure du VU réduira la valeur d'environ 20 %. Deuxièmes point est le % de saturation en eau des échantillons, étudié par [108] pour un béton a base de déchet de construction, résultant avec des VU plus élevées puisque les ondes voyageront dans l'eau et pas dans le vide comme c'est le cas des échantillons secs. Pour notre cas c'est une saturation à 100%, toutefois, cet effet a été minime, selon

les rapports de Malhorta [105]. La troisième raison pour laquelle VU sont élevées est l'utilisation de faible fréquence des ondes (54 kHz). Selon Al-Akhras cité par [107] la fréquence d'onde inférieure conduit à un UPV plus élevé.

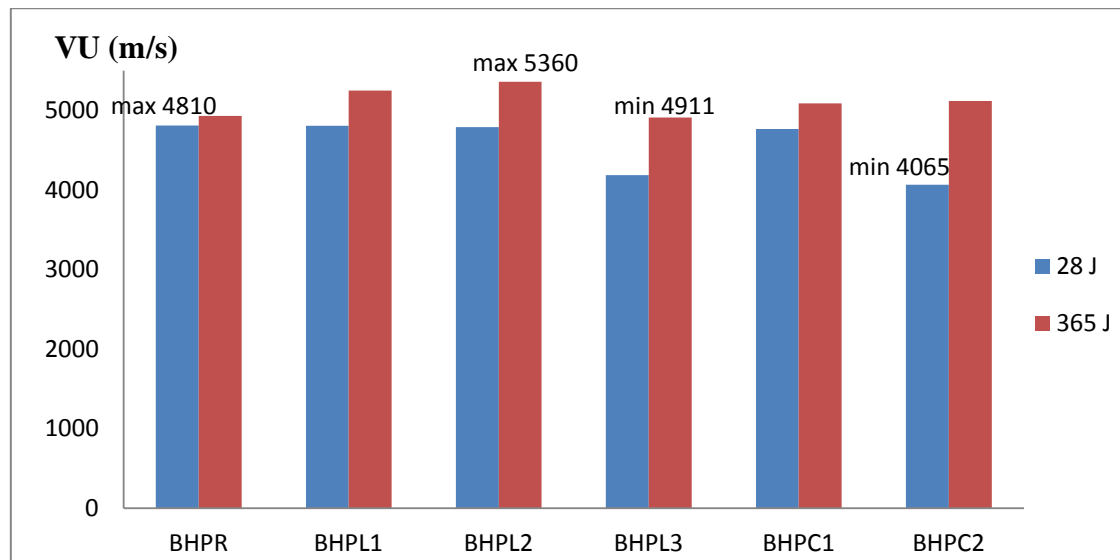


Figure 99. Vitesse ultrasonique des BHP en fonction du dosage en poudre de verre.

En comparant les VU de cette recherche avec les travaux de Ghernouti [109 et 110], qui ont étudié des bétons à base de plusieurs ajouts fines comme remplacement partiel du sable ou ciment, on conclue qu'il s'accordent bien de sorte que la VU augmente avec l'ajout de fine (métakaolin , poudre de marbre et poudre de calcaire) sauf pour le déchet plastique ou sa VU était inférieure au béton témoin vue la faible masse volumique de ce dernier . La composition chimique du métakaolin riche en silice étant très proche à celle de la poudre de verre, Ghernouti et al [109] ont trouvé que le VU la plus élevée de 4415 m/s correspondait au mélange contenant 30% de métakaolin et qui concordait bien avec la résistance à la compression.

2. 3. 2. Effet du rapport E/L=0.5

La figure 100 représente l'effet du rapport E/L sur la vitesse à ultrason VU à l'âge de 365 jours pour l'ensemble des bétons confectionnés.

Les meilleures VU étaient enregistrées pour le béton à faible rapport E/L, La réduction de la vitesse des ondes ultrasonores VU à mesure que le rapport eau-ciment augmente peut être expliquée par le fait que l'augmentation de la quantité d'eau entrainera une augmentation du volume des vides capillaires et les micro fissures dans la pate cimentaire provoquant ainsi la réduction de la capacité du béton à transférer des ultrasons, comme était confirmé par plusieurs travaux tels que [105] mais pour un béton sans poudre de verre. Une augmentation des cavités capillaires et des micro-fissures conduisent à des résistances du béton aux ondes ultrasonores, ce qui causera une baisse de la vitesse signalé par Mehta [121]. De plus [106] a signalé que les ondes ultrasonores dans le béton dépendent fortement de la taille maximale des agrégats. La vitesse d'onde ultrasonore dans le béton diminue quand la taille de des agrégats bruts utilisés augmente avec des rapports eau-ciment plus élevés, a savoir que pour ce travail le plus grand granulats est le 16 mm.

En comparant les résultats de la figure 96 et 100 on remarque que les vitesses VU des bétons formulés avec E/L et E/C = 0.5 s'accordent avec les résultats des résistances à la compression à 365 jours tel que la VU du béton BOC2 est de 4780 m/s étant la plus élevée et une excellente qualité de béton

comme sa résistance à la compression, prouvant encore une fois que la substitution de 20% du ciment par la PV avec un rapport limité de E /C donne les meilleurs résultats

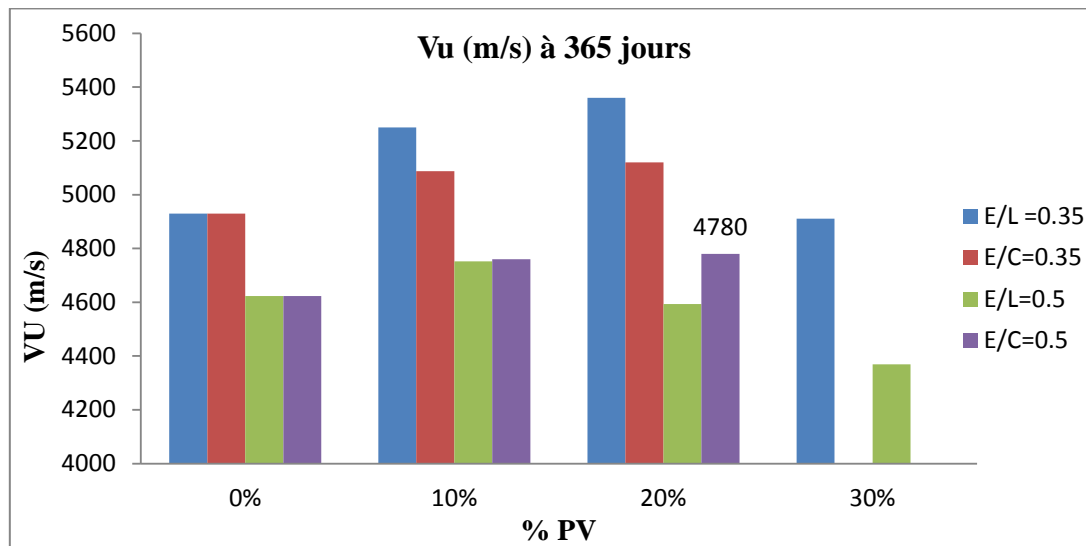


Figure 100. Effet du rapport eau /liant et le taux de la PV sur la Vitesse ultrasonique

2. 3. 3. Analyse statique des résultats par corrélation

L'analyse des corrélations a été effectuée entre les résistances à la compression, les masses volumiques, et les vitesses ultrasoniques en fonction du pourcentage de substitution par la PV à l'âge de 28 et 365 jours, il a été observé qu'il y a une bonne corrélation entre ces propriétés. Une relation linéaire de forme de : $y = Ax^2+Bx+C$ est obtenue étant donné un meilleur ajustement des données avec les valeurs de R^2 . Les bétons concernés par cette partie sont ceux présentés dans le tableau 21 (BHPR, BHPL1, BHPL2, BHPL3, BHPC1, BHPC2).

➤ Entre VU et masse volumique

Les équations de régressions et les valeurs du coefficient de corrélation entre VU et masse volumique sont montrées sur les Figures 101. Comme il ressort de ces résultats, la valeur du coefficient de corrélation varie de 0.19 à 0.23, ce qui montre qu'il y a une faible corrélation entre la VU et la masse volumique des BHP à l'âge de 28 et 365 jours, la VU augmente quand la masse volumique augmente également mais d'une façon non significative. Cette constatation peut être liée à la différence de base des masses volumiques et la finesse du ciment CPA et la PV.

➤ Entre VU et résistance à la compression

La figure 102 représente la relation entre la VU et la résistance à la compression des BHP. Les valeurs élevées du coefficient de corrélation (0.96 et 0.99) indiquent qu'il y a une forte corrélation positive entre ces propriétés du béton. Cela signifie que l'incorporation de PV dans le béton augmente ses propriétés de résistance. Il rend la matrice plus dense en raison de la finesse de la PV se qui se répercute sur la durabilité de ces bétons à long terme.

La valeur du coefficient de corrélation était proche de un. Cela signifie que PV dans le béton donne une influence significative sur les propriétés de mécaniques. Le PV diminue la porosité du BHP en associant avec la matrice cimentaire que dans le BHP de référence. Il diminue de sa masse volumique et augmente la connectivité des pores dans le béton ce qui augmente la VU.

Ces résultats de VU dépassant les 5000 m/s concordent avec les travaux de [111] qui a étudié un béton à base de cendres volante et de micro silice très riche en silice, contenant 90 % de SiO_2 (par masse), ou

il conclu que les tests ultrasoniques avec une utilisation de 10 % de micro silice a coté des cendres volantes avec pourront être une bonne alternative pour prédire la résistances de ces bétons.

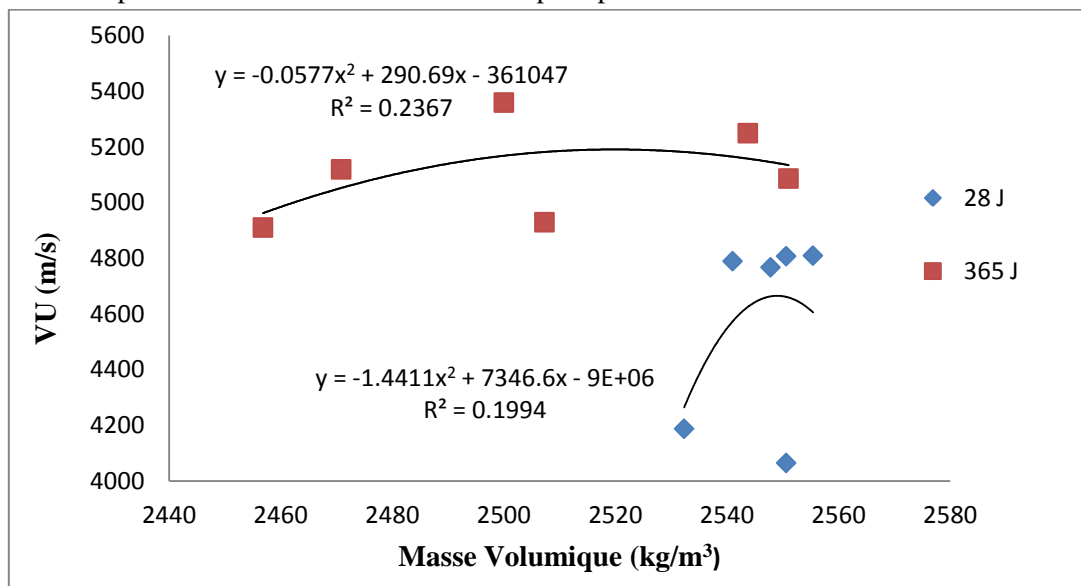


Figure 101. Corrélation entre vitesse ultrasonique et la masse volumique des BHP

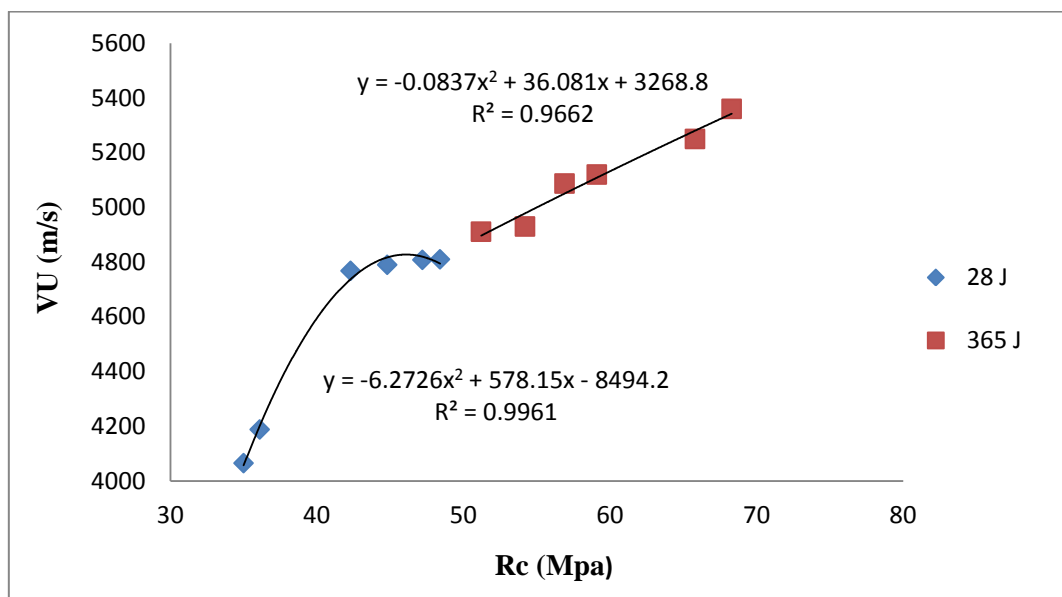


Figure 102. Corrélation entre vitesse ultrasonique et résistance à la compression des BHP

2. 4 Etude de la Microstructure des bétons BHP et ordinaires

Aux premiers grossissements de 50x à 250x, aucune structure notable n'est visible. La structure est constituée d'une masse homogène de pâte de ciment percée de pores ouverts, on observe les défauts de microfissuration due aux essais de compression. Il s'agit de microfissures présentant des ouvertures allant de 1 à quelques centaines de μm . Elles sont non coalescentes, c'est-à-dire qu'elles ne forment pas un chemin continu à travers la structure (grossissement 50x). Elles sont principalement dues au caractère hétérogène du béton.

Par contre, aux grossissements plus élevés de 500x à 1000x, on observe les défauts de macro fissurations. L'ouverture de ces fissures varie de quelques centaines de μm à quelques mm. Ces fissures sont coalescentes (figure 103, J).

Les particules de sable et granulats sont parfois détectables, les granulats et sable apparaissent en gris sombre, la poudre de verre en gris moyen et le clinker anhydre en contraste plus brillant ; elle contient beaucoup de clinker dispersés par l'effet du polycarboxylate.

Les échantillons de béton sans poudre de verre présentent une porosité importante qui se traduit par la présence de points noirs sur les figures **A, C, E**. (Air occlus), Contient plus de bulle d'air que la figure **B** du fait de sa faible teneur en fine de PV avec une finesse plus élevée.

On pourra résumer les observations MEB comme suit.

❖ **Effet de la poudre de verre et effet de l'âge** (Figure 103)

Globalement, on observe moins de particules de ciment anhydres dans les pâtes avec PV par rapport à celle du témoin. Ceci serait sans doute dû d'une part à la quantité de ciment moindre dans les mélanges avec ajout entraînant l'augmentation du rapport E/C relative à l'effet de dilution qui favorise la défloculation des grains et certainement l'amélioration de l'hydratation des grains de ciment selon [48]. D'autre part, la consommation de la portlandite par l'ajout contribue à l'accélération de l'hydratation du ciment pour maintenir l'équilibre du milieu réactionnel. Par ailleurs, les pâtes avec ajouts semblent présenter plus de gel réduisant la quantité de vides apparents. Ces observations suggèrent une contribution non négligeable de l'hydratation de la PV. Ces résultats sont en forte cohérence avec les résistances à la compression obtenues pour des bétons de rapport E/L équivalent incorporant les ajouts après 90 jours d'hydratation. En effet, les résistances à la compression des bétons avec PV sont supérieures à celles du témoin ;

A jeune âge la poudre de verre garde bien sa forme arrondi (voir chapitre 4) ce qui montre qu'elle est hydratée seulement en surface, cela indique qu'il ya pas ou très peu de réaction pozzolanique dans nos échantillons, qui est connue d'être assez tardive dans les bétons [3]

Une nette différence se dégage entre la microstructure à 7 et 90 jours, attribuable à l'effet de l'âge d'une part et à l'apport substantiel de la poudre de verre à travers une réaction pouzzolanique plus avancée d'autre part. En effet, à 7 jours, on observe une porosité apparente importante avec des particules cimentaires grossières tandis qu'à 90 jours la microstructure apparaît très peu poreuse avec des particules cimentaires plus fines. Cette différence s'expliquerait aussi en partie par l'hydratation lente de la poudre de verre qui conduit à l'amélioration considérable de la matrice à long terme qu'à jeune âge. On observe à travers cette analyse que le remplissage des vides se fait évidemment avec l'âge des pâtes.

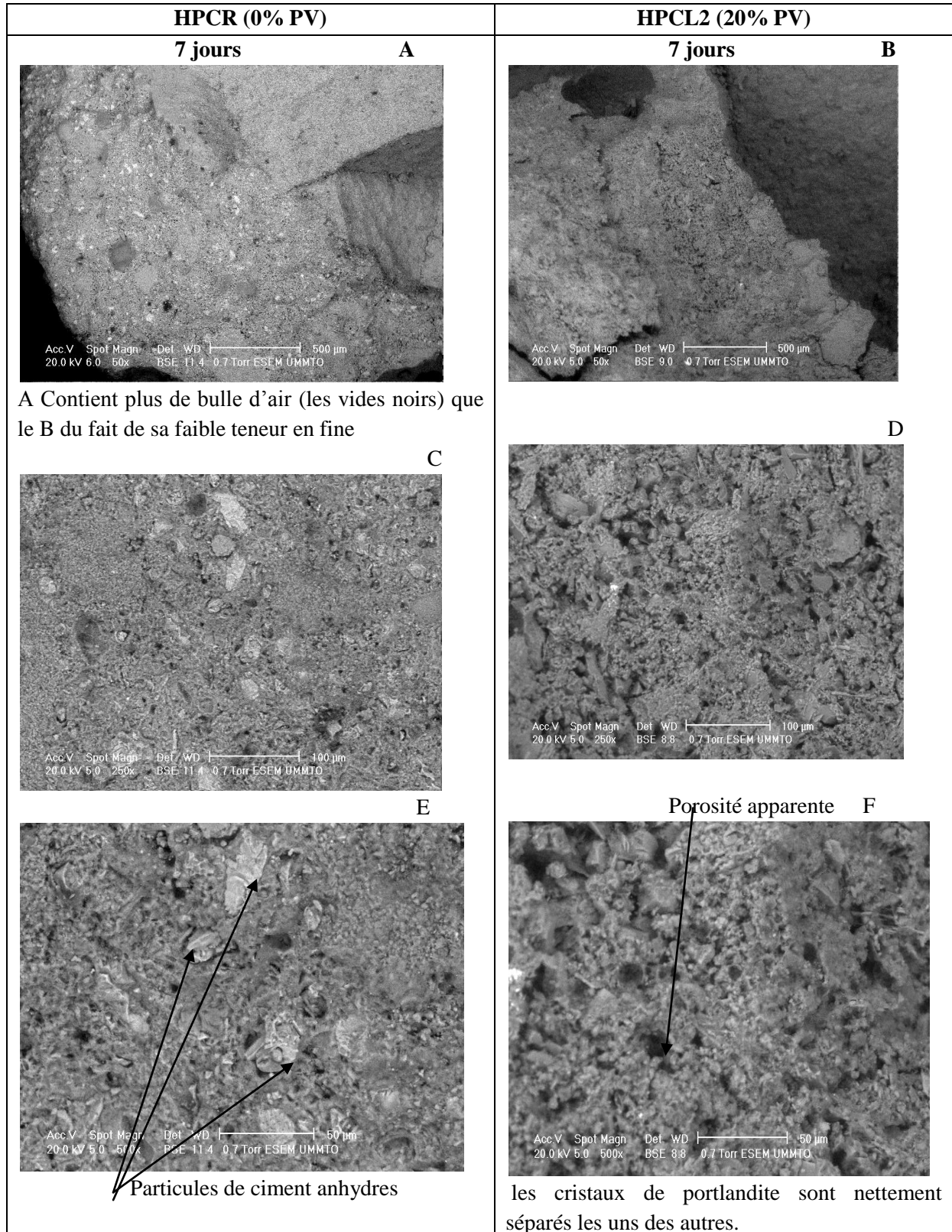
La taille des particules de ciment anhydre ou celle des particules de la poudre de verre non hydratée diminue considérablement avec l'avancement de l'âge de la pâte, due à l'évolution des réactions d'hydratation impliquant ces particules. Ce phénomène de la réduction de la taille des grains et des pores conduit conséquemment à une tortuosité et une segmentation accrue des pores qui est principalement à l'origine de la diminution considérable de la pénétrabilité des matrices par des agents extérieurs, en présence des ajouts cimentaires. Ces images mettent en exergue la contribution de la poudre de verre dans l'amélioration de la microstructure des matrices cimentaires.

❖ **Effet du rapport E/L** (Figure 104)

Les pâtes de rapport E/L = 0.5 présentent moins de particules de ciment anhydre contrairement à celles de rapport E/L = 0.35, est attribuable raisonnablement à une limitation de la réaction d'hydratation du ciment par manque d'eau de gâchage. En effet, il apparaît souvent que les matrices cimentaires de faible rapport E/L présentent plus de particules de ciment non hydraté qu'une matrice cimentaire de rapport E/L élevé, consécutive à une croissance du degré d'hydratation avec le rapport E/L. Puisque les produits d'hydratation remplissent davantage les vides ou les espaces inter-particules avec

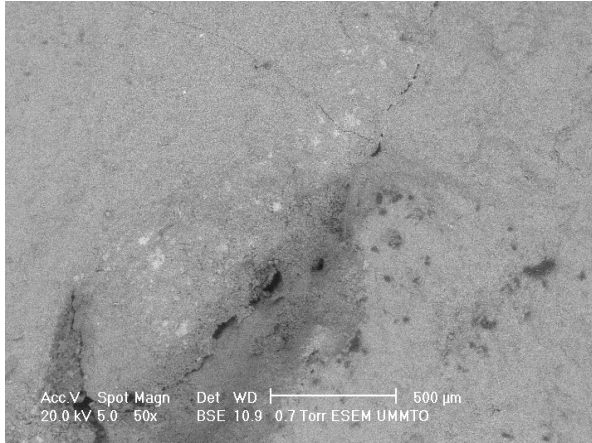
l'augmentation du rapport E/L. De plus, des études antérieures rapportent que la poudre de verre s'hydrate mieux en présence de plus d'eau (rapport E/L élevé) [112, 48].

Cependant la figure T Contient plus de bulle d'air que le S du fait de l'augmentation de quantité d'eau et sa faible teneur et superplastifiant . Sur la figure Y on remarque l'apparition des CSH sous forme de nid d'abeilles condensés contre la figure W ou une structure plus développée avec repérage des grains de ciment anhydre.



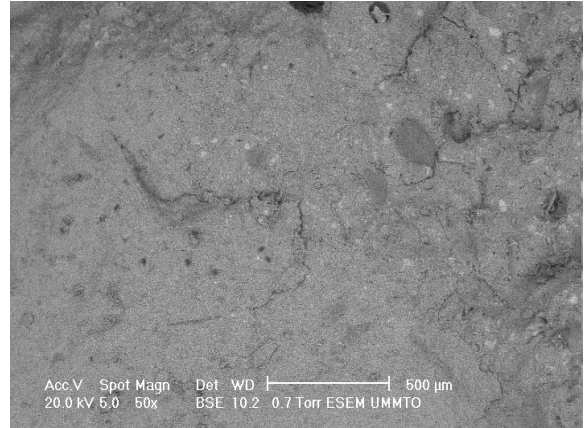
28 jours

G

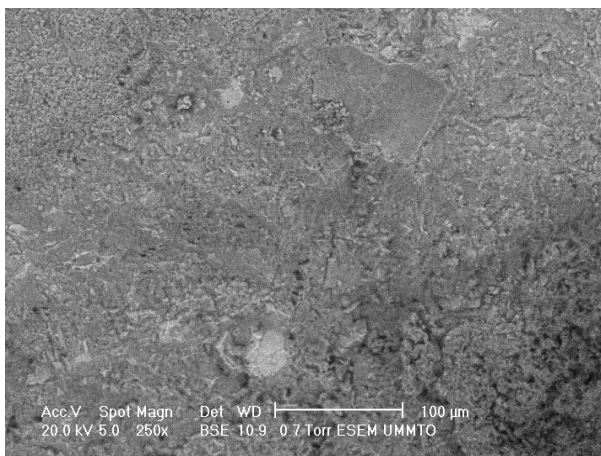


28 jours

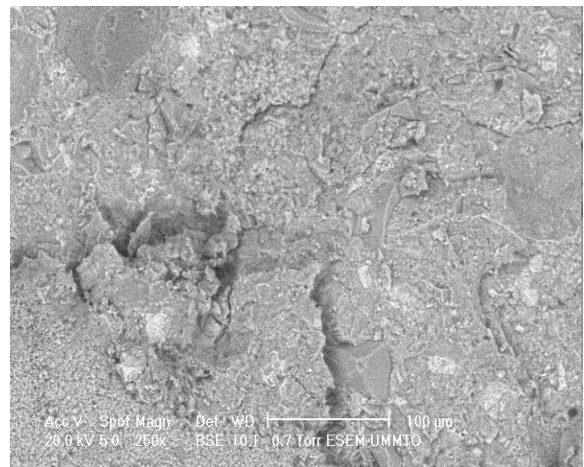
H



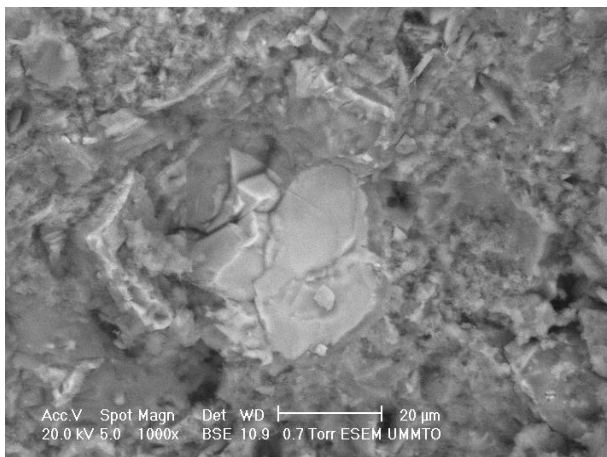
I



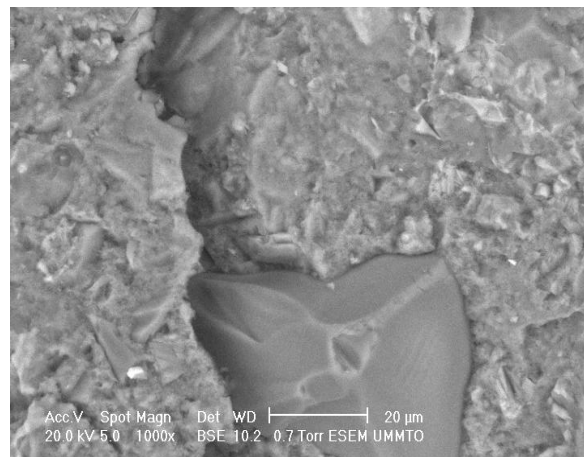
J



K



L



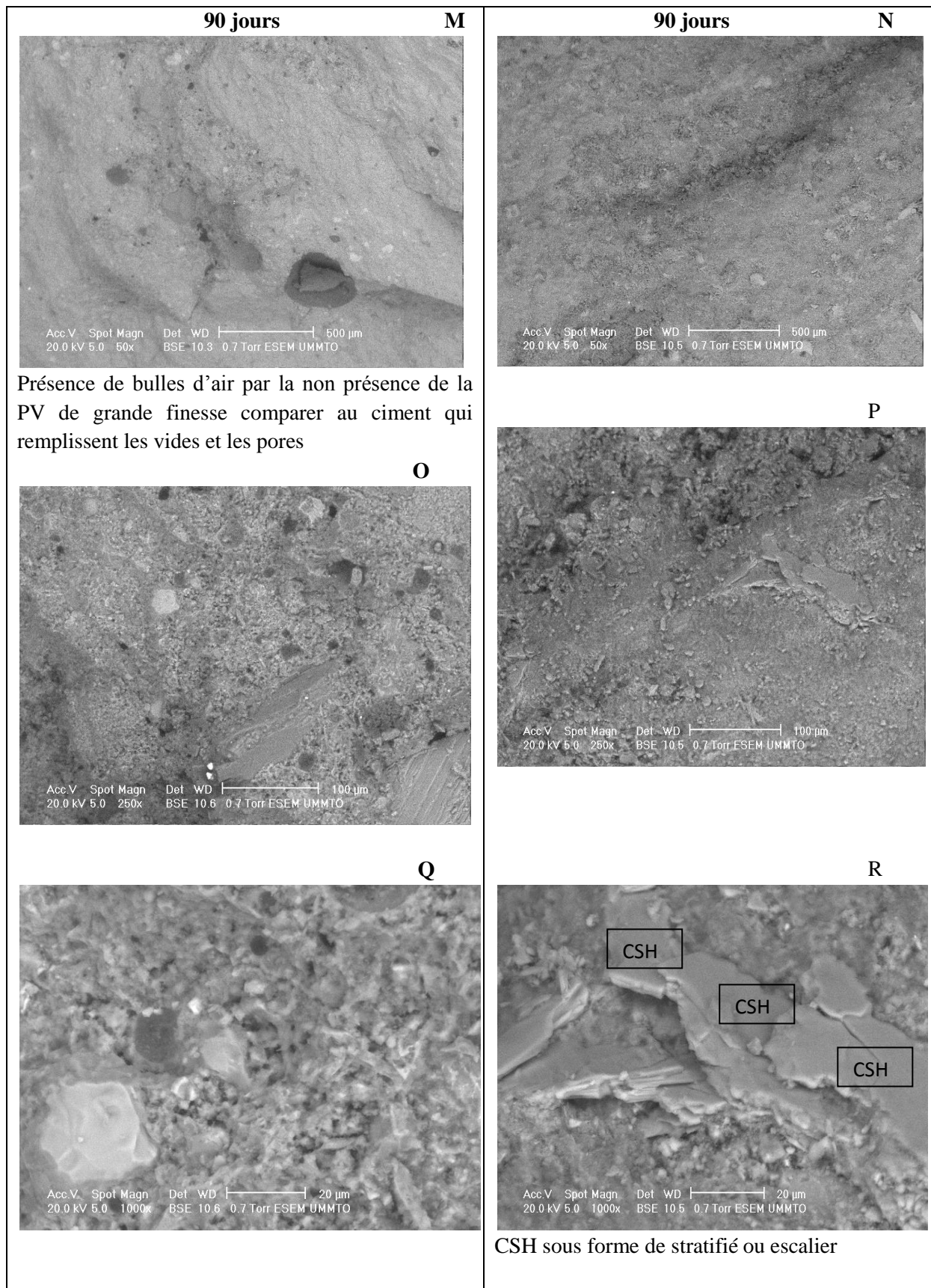


Figure 103. Image MEB pour un béton avec 0% et 20% de poudre de verre aux âges de 7, 28 et 90 jours

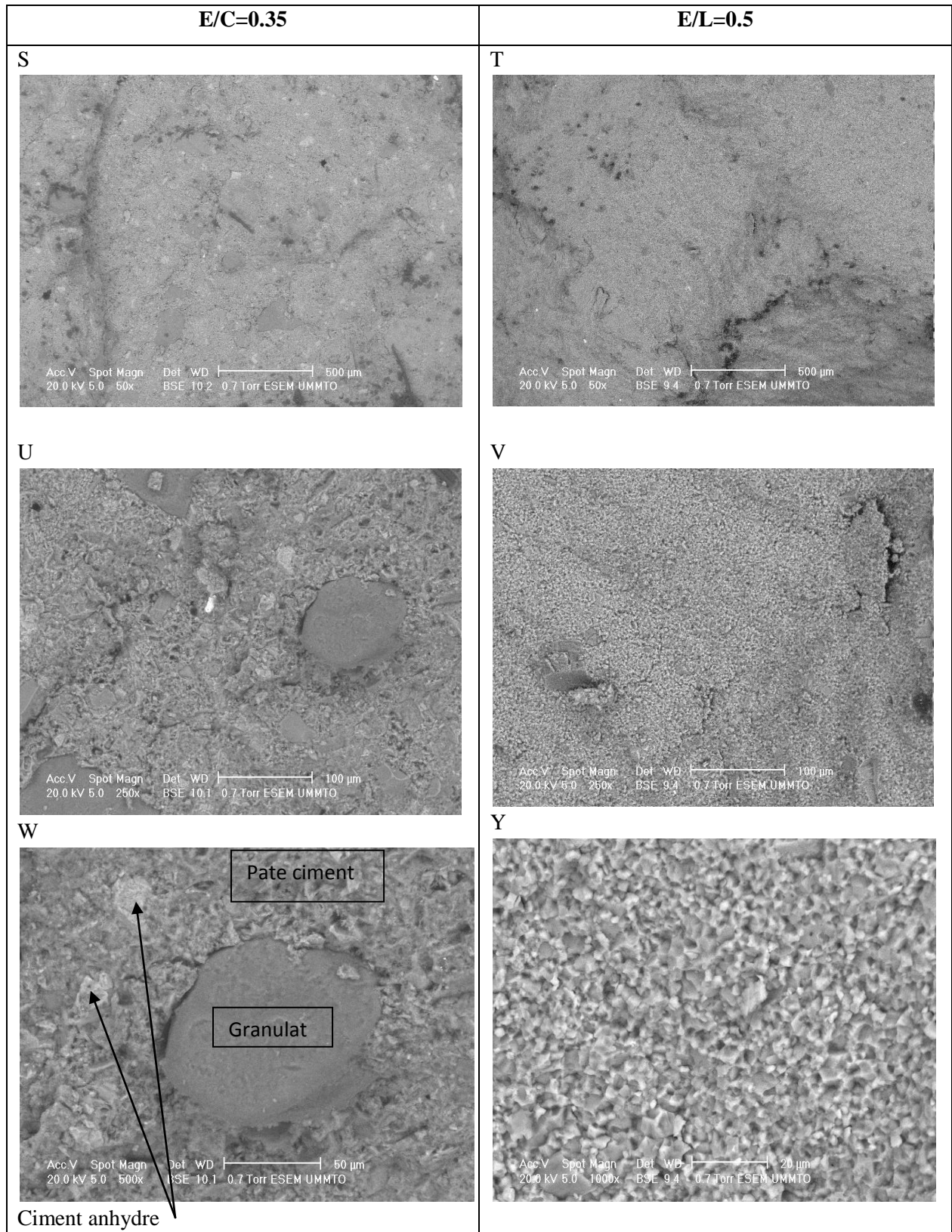


Figure 104. Image MEB pour un béton avec 20% de poudre de verre a l'âge de 28 jours

2. 5 Examen visuel lors d'essais mécaniques sur BHP

Nous avons essayé de mener une étude visuel sur la composition interne des BHP élaborés (Figure 105), sur la propagation de fissures lors de l'écrasement du béton (Figure 107) ainsi que l'allure prise par l'ouverture des fissures après essai de flexion 3 points (Figure 106 A et B).

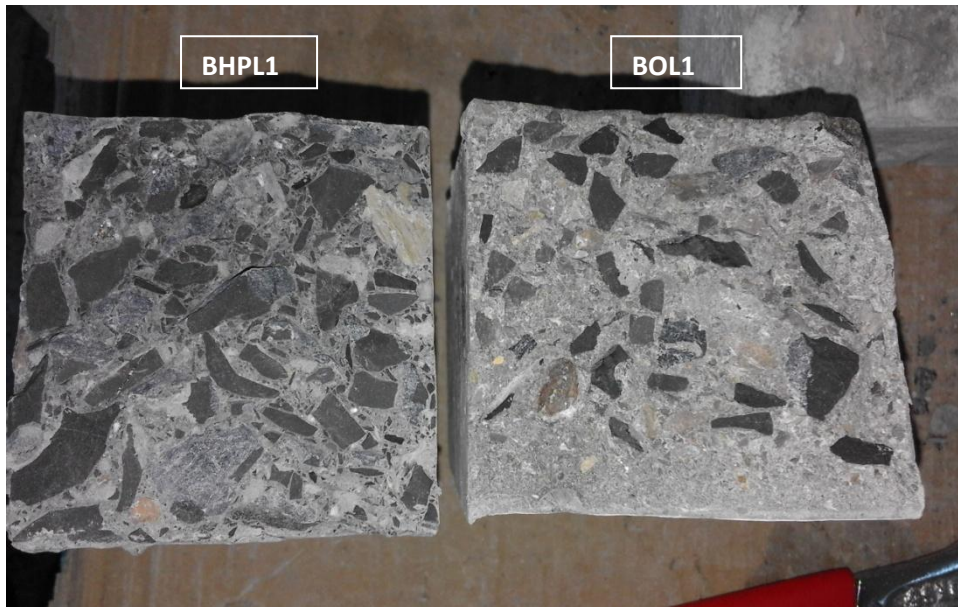


Figure 105. Image photographique réelle de la structure interne après essai de flexion 3 points

On a remarqué pour les différents BHP que la couleur des mélanges devient de plus en plus foncé avec l'augmentation de la quantité de la poudre de verre et une bonne répartition des granulats dans la matrice cimentaire donc une composition compacte détectée par la non présence des vides, répartition uniforme des constituants, ce qui est avantageux et offre un certains équilibre lors des essais mécaniques pour éviter dans l'ensemble de fragiliser une région par rapport à une autre.

Les fissures se situent au niveau des granulats et il n'y a pas d'effritement de la matrice cimentaire lors d'essai de flexion ce qui donne une idée sur la résistance de cette composition.

En faisant une comparaison entre les deux compositions avec une substitution de 10% de la PV sur la Figure 103, il est clair que le béton avec $E/L=0.35$ présente une meilleure structure interne, répartition uniforme des constituants contrairement au béton ordinaire avec le rapport $E/L=0.5$ ou on remarque que les granulats se concentrent sur la partie inférieure des éprouvettes lors de la confection du béton, un excès d'eau qui a engendré le flottement des particules légères contre les particules lourdes sous l'effet de leurs poids.

Vis-à-vis de l'allure des fissures dans la Figure 106 on remarque que les fissures sont presque droites (B) pour les BHP au droit d'application de la charge N sans éclatement superficiel du béton, ni endommagement de l'éprouvette ou même apparition de fissures ou microfissures, mais pour le béton BOL10 on a constaté quelques fissures et microfissures ainsi que l'éclatement d'une partie du béton.

La Figure 107 illustre la propagation dans le temps de la fissuration d'une éprouvette de béton type BHPL20 lors de son écrasement dans la presse, on remarque que l'ouverture des fissures se manifeste longitudinalement, elles sont presque droite au début mais en se propageant elles redeviennent un peu oblique, pas d'éclatement total de l'éprouvette mais juste quelques effritements. A la fin de l'essai l'éprouvette est récupérée avec sa forme cylindrique initiale sans de grands changements visuels à part les fissures et microfissures.

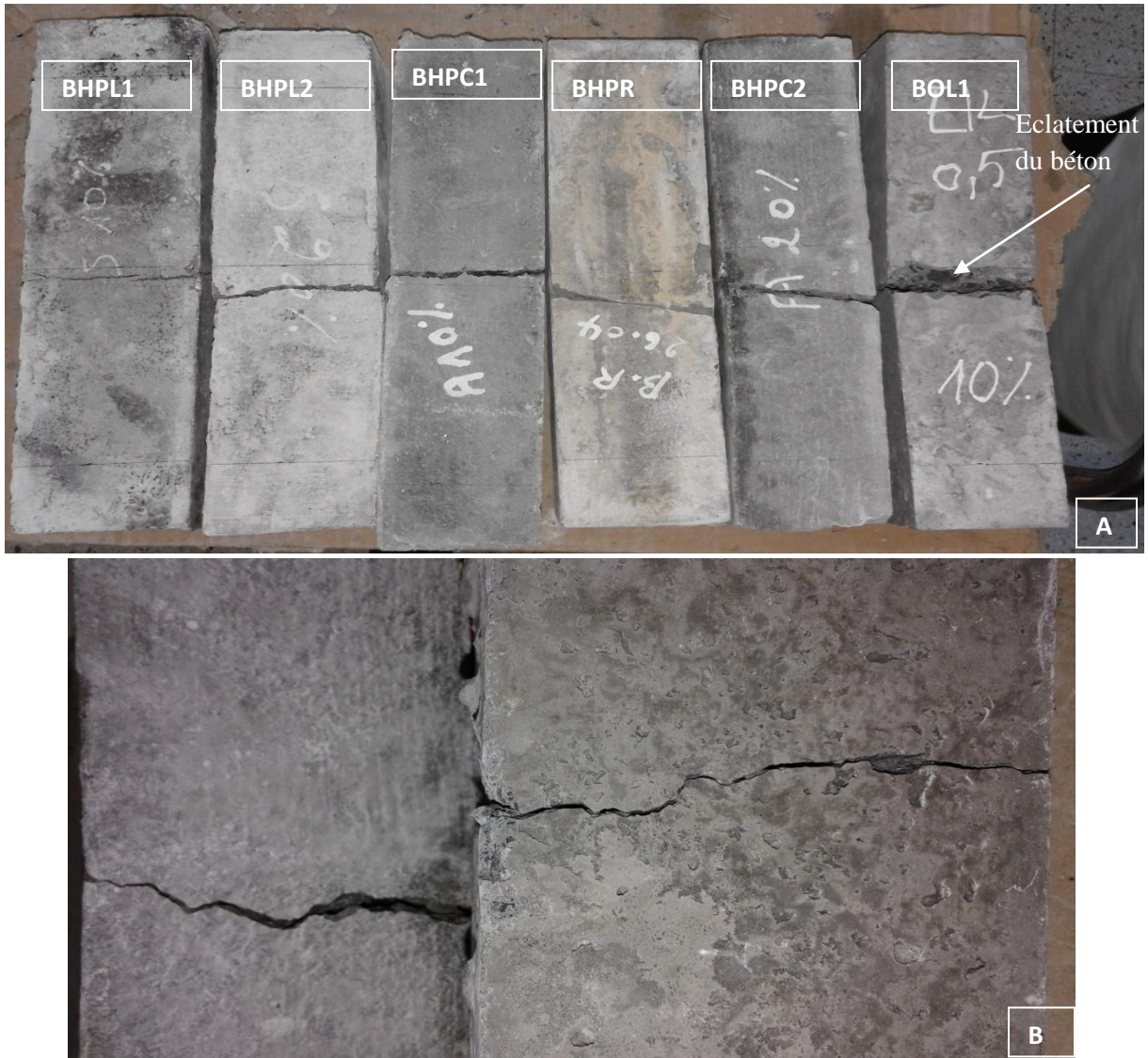


Figure 106. Image photographique réelle de l'ouverture de fissures après essai de flexion 3 point

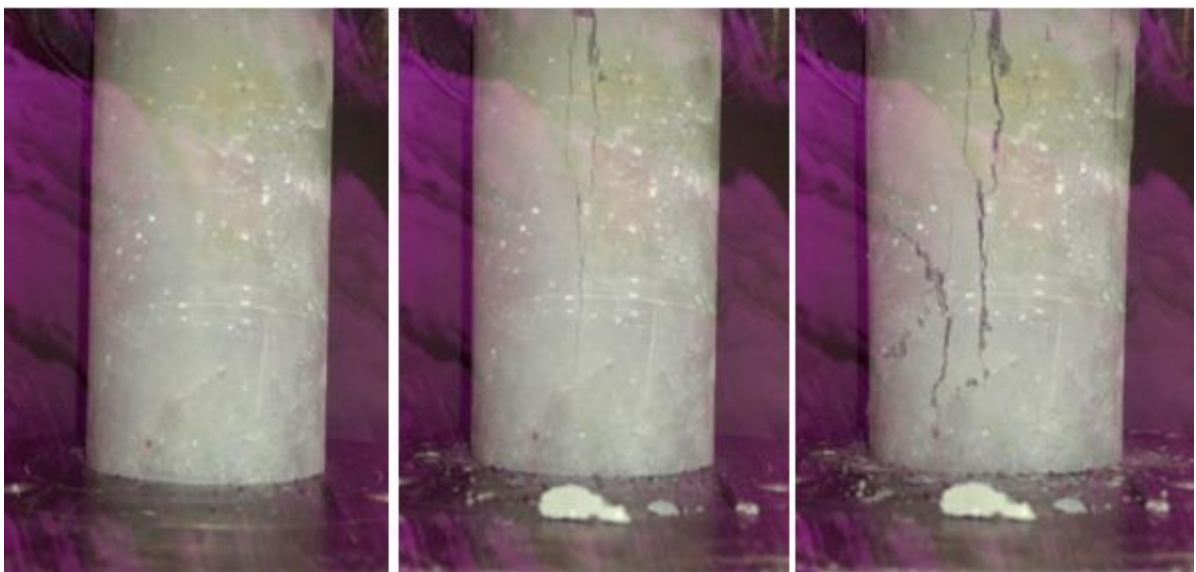


Figure 107. Image photographique réelle de la propagation de fissure lors d'un essai de compression
Conclusion

L'effet de la poudre de verre dépend donc de la classe de résistance ciment auquel on la substitue en comparaison avec d'autres travaux de littérature, la résistance à la compression augmente proportionnellement avec l'augmentation de la classe de résistance du ciment.

Il paraît que l'interaction de la poudre de verre avec les ajouts utilisés lors de la production des ciments commerciaux affecte négativement et freine à un certain degré le développement des performances mécaniques de la PV conjointement avec le ciment.

Pour l'effet du rapport eau-ciment égale à 0.35, les bétons formulés avec le rapport E/L ont des résistances en compression plus élevées que celles des bétons formulés avec le rapport E/C, d'où la quantité d'eau n'a pas suffi pour l'hydratation du ciment limité également par la quantité du superplastifiant utilisé.

En termes de performance mécanique, les meilleurs résultats sont obtenus pour les BHP formulés avec le rapport E/L et pour les BO formulés avec le rapport E/C, résultat que ce mélange ciment et PV a besoin d'une quantité intermédiaire pour extraire le meilleur en soit.

Dès jeune âge les bétons ordinaire avec poudre de verre développent des résistances plus élevées que celle du béton témoin sans poudre de verre, une résistance de 68.3 MPa est atteinte pour les bétons à hautes performances BHP contre une résistance de 45.2 MPa pour les bétons ordinaire BO, soit un gain de 21 MPa en réduisant la quantité d'eau de gâchage et en augmentant la quantité du superplastifiant.

La vitesse de son des BHP augmente avec le temps de durcissement pour l'ensemble des bétons, l'effet de temps de durcissement est plus significatif à des rapports eau-ciment plus élevés.

La qualité du béton déduite des vitesses à ultrason s'accordent bien avec les résultats de la résistance à la compression.

D'après les résultats obtenus le meilleur taux de substitution du ciment par la PV pour les BHP élaborés est 20% (entre 20 et 30% vu que les résultats du remplacement par 30% sont légèrement inférieur et à ceux de remplacement par 20%).

Les images MEB montrent la présence de plus de particules de ciment anhydre dans la pâte témoin que dans celle contenant de la PV, traduisant une amélioration de l'hydratation des particules de ciment en présence de cet ajout. Il se dégage de ces images une réduction de la taille des vides apparents et celle des particules avec le temps. La taille des pores à long terme est d'autant plus petite que le rapport E/L diminue.

Chapitre 9

Résultats de la durabilité

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur de ces matériaux poreux. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats.

Les BHP sont connus par leur structure dense ce qui les qualifie de matériaux plus résistants par rapport aux bétons ordinaires envers des phénomènes affectant la durabilité.

Les résultats présentés dans ce chapitre touchent par conséquent les propriétés chimiques des mortiers et BHP élaborés à base de poudre de verre caractérisant leur résistance aux attaques chimiques des sulfates, des acides ainsi que eau de mer.

Introduction

Les agressions chimiques rencontrées par les matériaux à matrice cimentaire sont très variées. En raison de sa porosité et de la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matériaux peuvent se produire et faire évoluer la composition solide de la pâte de ciment [113]. Ces phénomènes de transport et de réaction d'après [21] sont réalisés à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires figurent les attaques par les acides et par les sulfates.

Comme déjà détaillé dans les parties I et II, l'utilisation de ciment avec la poudre de verre génère une réaction entre l'hydroxyde de calcium produit par l'hydratation du ciment et la silice SiO₂ amorphe de la PV, cela a conduit à une augmentation de la formation du gel de silicate de calcium hydrate (C-S-H) connu comme 2^{ème} génération et donc à l'augmentation de la résistance et de la densité [114, 52].

Hadjsadok [115], a conclu que le béton à base de laitier est améliorée à long terme en utilisant un faible rapport eau/liant et la résistance au sulfate du mortier est améliorée par le remplacement jusqu'à 30% du ciment.

Cependant Laoufi [113] a travaillé sur l'évaluation de la durabilité des mortiers pouzzolaniques exposés à l'attaque chimique, il a conclu que le mortier à 30% de pouzzolane comme étant le niveau plus élevé de pouzzolane qui a eu la meilleure résistance et résistance à la solution acide. Bederina [116] a étudié l'évaluation de l'effet du remplacement partiel et total du sable de rivière par du sable calcaire sur la durabilité du mortier soumis à des environnements chimiques. Cette étude a permis de conclure que la résistance aux attaques de Hcl des mortiers contenant du sable calcaire est meilleure que celle des mortiers contenant du sable de silice.

De cette façon les résultats obtenus par Zidol [48] ont révélé qu'une réduction significative de la pénétrabilité d'ions de chlorure à 56 jours en présence de la poudre de verre donc une variation

relativement négligeable de la pénétrabilité des ions de chlorure a moyen ou long terme dans les bétons contenant le poudre de verre ou d'ajouts de cimentation avec variation du rapport eau –liant.

NOTA : Après l'élaboration des mortiers et bétons confectionnés avec le rapport E/L et E/C égale à 0.35, une grande partie des spécimens est conservée dans l'eau du robinet, c'est celle qui a servi à l'étude principale des caractéristiques mécaniques avec résultats présentés dans le Chapitre 7, une autre partie, qui sera soumise à des tests de durabilité. Après 28 jours de conservation dans l'eau du robinet considéré comme environnement non agressif, car il est riche en calcium qui résulte de la dissolution de la chaux dans l'eau, c'est donc un environnement alcalin.

Les éprouvettes de mortiers et BHP étaient placées dans des milieux différents pour évaluer leurs durabilité (voir Figure 72), Notons que, selon la littérature, les deux environnements C et D sont agressifs et provoquent une dégradation accélérée [116].

1. Résultats des attaques sur mortier

Pour évaluer la durabilité des mortiers avec poudre de verre et évaluer son effet sur la résistivité aux attaques acides et sulfates, des tests mécaniques et physiques ont été effectués sur des échantillons de immergés pendant 180 jours dans les solutions, pour cela les étapes suivantes ont été effectuées conformément à la norme ASTM C 267.

1. 1. Examen visuel

L'examen visuel des mortiers ayant subits des attaques chimiques est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes, et de confirmer et comparer les résultats obtenus ci après.

Après 180 jours d'immersion, on a constaté peu de changement sur l'aspect physique et visuel des échantillons, peu de dégradation et une variation minimale au niveau du volume :

- Des dépôts blanchâtres sont observés à la surface des échantillons conservés dans la solution $MgSO_4$ sans changement particulier de base de couleur (Figure 108), selon [116] contrairement à ceux conservés dans la solution acide HCl, ils se sont assombris avec une couleur de gris très foncé
- Une petite dégradation de la surface externe des mortiers dans la solution HCl et apparition de beaucoup de pores pour ceux conservés dans la solution $Mg SO_4$.
- Dépôt d'une quantité de gypse dans le fond du réservoir de conservation. Le gypse est formé de la réaction entre la portlandite et la solution d'attaque. En plus de la réaction avec la portlandite, l'acide sulfurique décompose la matrice cimentaire par la décalcification du silicate de calcium hydraté [C-S-H], ce qui contribue ainsi à la perte en masse des échantillons immergés dans ce type d'acide. Ces résultats sont en accord avec les observations faites par [23, 68].





Figure 108. Aspect général des échantillons après 180 jours de réservations dans les deux solutions



Figure 109. Les changements visuels remarqués à 180 jours

1.2. La variation de masse

La figure 110 - 111 et 112 représente les pertes de masse des mortiers MHPR, MHPL1, MHPL2, MHPL3, dans les trois milieux : acide, sulfate et eau de mer, estimées avec l'application de l'équation 20.

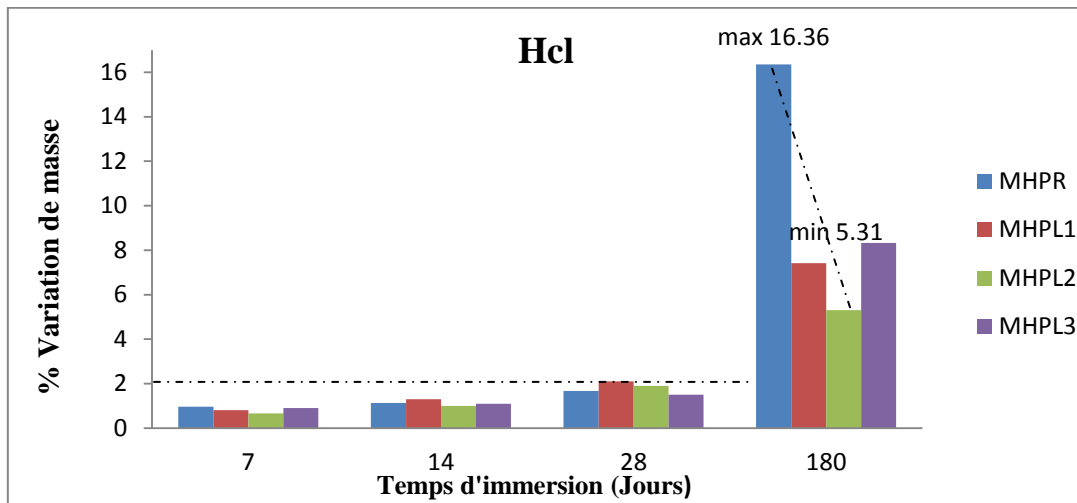


Figure 110. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution acide

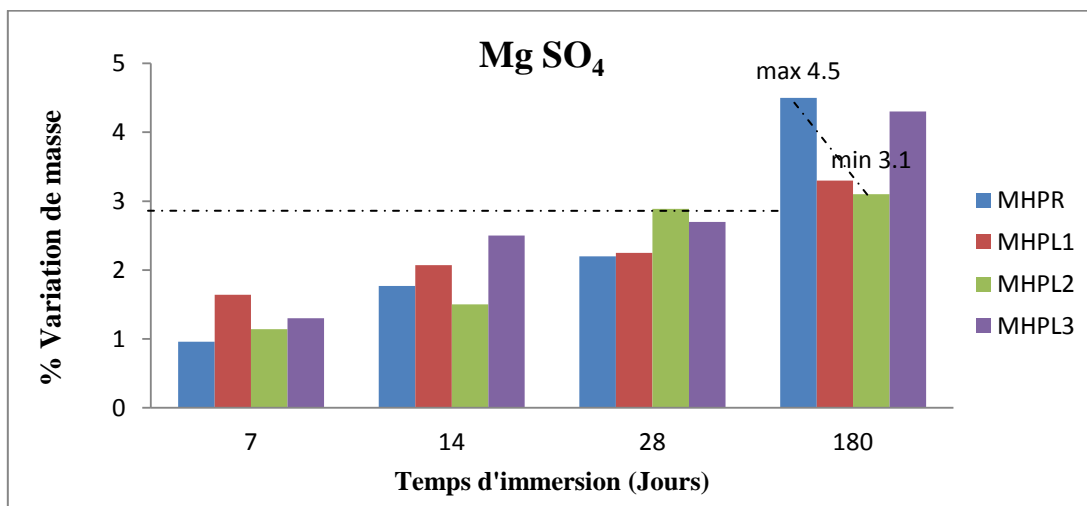


Figure 111. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution sulfatique

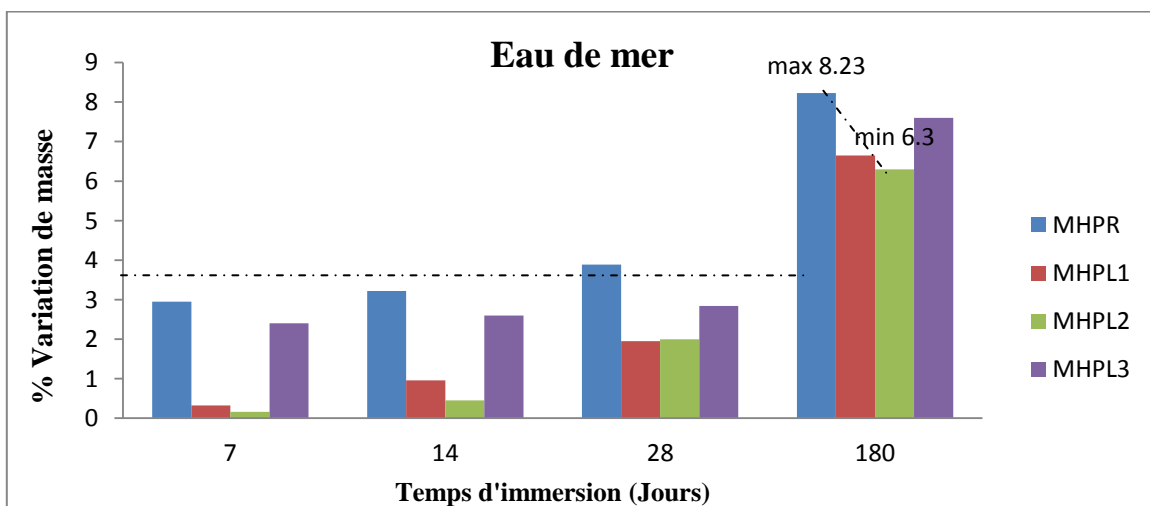
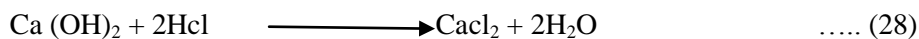


Figure 112. Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau de mer

La figure 110 montre que les pertes de masse des différents mortiers augmentent dans les trois milieux avec le temps d'immersion et diminuent avec l'augmentation de la teneur en PV de 10 à 20%, pour l'ajout de 30% la perte est inférieure à celle du témoin sans PV.

Il y a une perte de masse inférieure à 2% pour tous les mortiers de 7 à 28 jours d'immersion dans la solution Hcl, après à l'âge de 180 jours ces pertes ont augmenté pour atteindre un pourcentage de 16% enregistré pour le MHPR comme valeur maximale dépassant ainsi les pertes au niveau de MHPL1, MHPL2, MHPL3 ce qui montre le rôle joué par la PV concernant le développement des capacités mécaniques. Cette variation reste vraiment inférieure aux variations exposées en littérature tels que les travaux de [117, 47, 7, 84] réalisés pour des bétons avec différents ajouts, ou il a été expliqué qu'une partie considérable de l'hydroxyde de calcium libre (Ca(OH)_2), libéré après l'hydratation du ciment, sera lessivée lorsqu'il sera soumis à une attaque par l'acide chlorhydrique (Hcl) donnant de l'hydroxyde de calcium, selon la réaction chimique suivante:

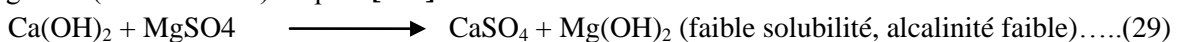


Le Chlorure de calcium (CaCl_2), obtenu après réaction de l'acide chlorhydrique avec de la chaux de ciment, est un sel très soluble et très agressif envers le ciment Portland [118].

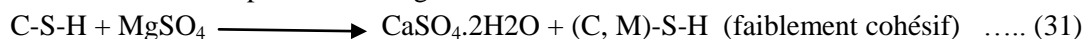
L'incorporation de la poudre de verre dans la pâte de mortier augmente la résistance chimique par rapport aux agressions de l'acide Hcl, car elle est de nature siliceuse, elle réduit les pores capillaires en remplissant ces pores avec du gel CSH de deuxième génération formé à partir du sel et de la portlandite [52].

Le même comportement que dans l'acide Hcl est observé pour la solution MgSO_4 avec une perte de masse plus significative dès les premiers jours d'immersion (figure 111), sauf que la variation de masse est vraiment réduite à 8% pour le mortier témoin sans PV comme valeur maximale, donc les mortiers avec substitution de PV restent meilleurs vis-à-vis de l'attaque sulfaique en attendant de confirmer avec l'essai de compression.

Ce phénomène est justifié par la formation de produits encombrants; l'attaque du mortier par les sulfates de magnésium provoque une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les ions sulfate et l'hydrate d'aluminate de calcium C_3A et les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durci. C'est cela que le sulfate de magnésium MgSO_4 est connu comme étant très agressif (double action) d'après [100] :



Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



Donc cette faible variation de masse ne pourra être expliquée que par la présence de la PV avec la présence de fort CSH formés par la réaction pozzolanique entre le ciment et PV très peu soluble en présence de MgSO_4 .

Vis-à-vis de la perte de masse dans l'eau de mer illustrée sur la figure 112, nous pouvons également voir une influence positive de la poudre de verre comparant avec le MHPF qui reste toujours le plus sensible à ces attaques chimiques, ceci est principalement dû à la faible diffusion et à la réduction de la teneur en portlandite (CH) par réaction pozzolanique qui se traduit à long terme, qui retardent et empêchent la formation de gypse secondaire et d'ettringite [3].

Enfin, la variation de la masse de ces mortiers avec PV peut être expliquée par les processus de transport, de perméabilité et de diffusion, dans la matrice de ciment. Ces propriétés de transport sont

considérées comme des "indicateurs de durabilité". Ils dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et du contenu interstitiel du matériau.

1. 3. La profondeur de dégradation

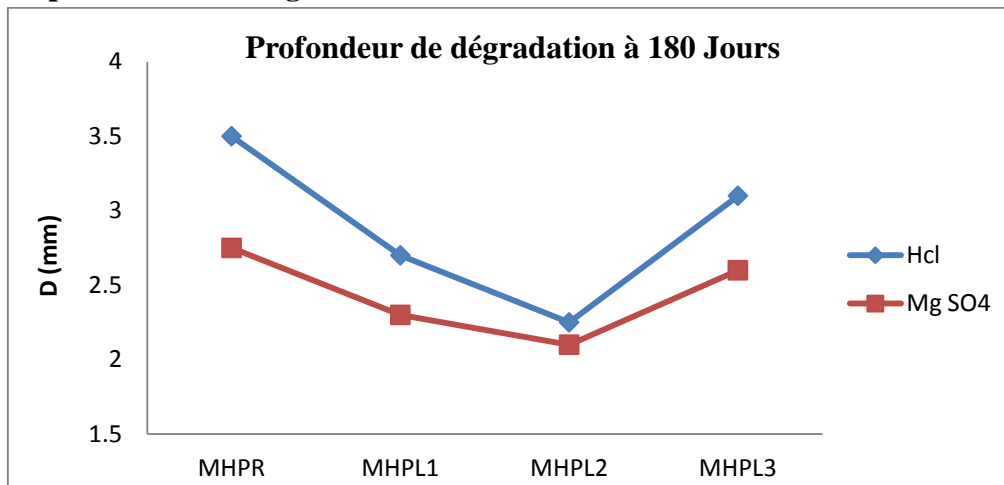


Figure 113. La profondeur de dégradation à l'âge de 180 jours

La détermination de la profondeur de dégradation a été effectuée en mesurant la différence entre l'épaisseur de la zone colorée par la phénolphtaléine et l'épaisseur initiale de l'échantillon. La figure 113 montre que l'épaisseur de dégradation des échantillons immergés dans la solution acide sulfurique est plus grande que celle des échantillons immergés dans la solution sulfatique pour l'ensemble des échantillons, cependant le comportement est presque similaire dans les deux solutions, avec une dégradation plus profonde de l'ordre de 3.5 mm pour le MHPR suivi de MHPL3 après le MHPL1 et enfin la dégradation minimale est enregistrée pour le MHPL2 qui a mieux résisté aux attaques.

Ces profondeurs de dégradation coïncident bien avec la résistance à la compression ou l'on a trouvé que le MHPL2 était le plus résistant, la PV confirme encore que son ajout a un effet positif contre les attaques acides et sulfatiques dans les milieux cimentaires.

1. 4. Les performances mécaniques

L'analyse des résultats illustrés à la Figure 114 montre que la résistance à la compression du mortier MHPL1 conservé dans la solution acide HCl se développe positivement en fonction du temps d'immersion jusqu'à 180 jours. Contrairement aux autres mortiers où une baisse de la résistance est remarquée durant les sept premiers jours de l'attaque acide, mais qui semble se reprendre progressivement jusqu'à l'âge de 28 jours. Au-delà de cet âge la résistance diminue encore mais cette fois-ci pour les quatre mortiers pour atteindre des valeurs avoisinantes celles d'immersion pour le MHPL1 et MHPL2 et des valeurs beaucoup plus inférieures pour les deux MHPR et MHPL3.

Ces résultats montrent une influence positive de la PV sur la résistance à l'attaque des sulfates, ceci est principalement dû à la faible diffusivité de ces mortiers et à la réduction de la teneur en portlandite par réaction pouzzolanique qui entraîne à long terme au même temps que leur immersion dans le HCl, ce qui retarde et empêche la formation de gypse secondaire et d'ettringite qui sont très sensibles aux attaques de chlorure de calcium (CaCl_2) [131] produit dans l'équation III. 1, ce qui a amené à une perte de masse mais pas à une perte de résistance vu l'intervention des CSH. Confirmé également par la perte de résistance à 180 jours du mortier MHPR sans poudre de verre estimée de 41% par rapport à sa résistance initiale d'immersion.

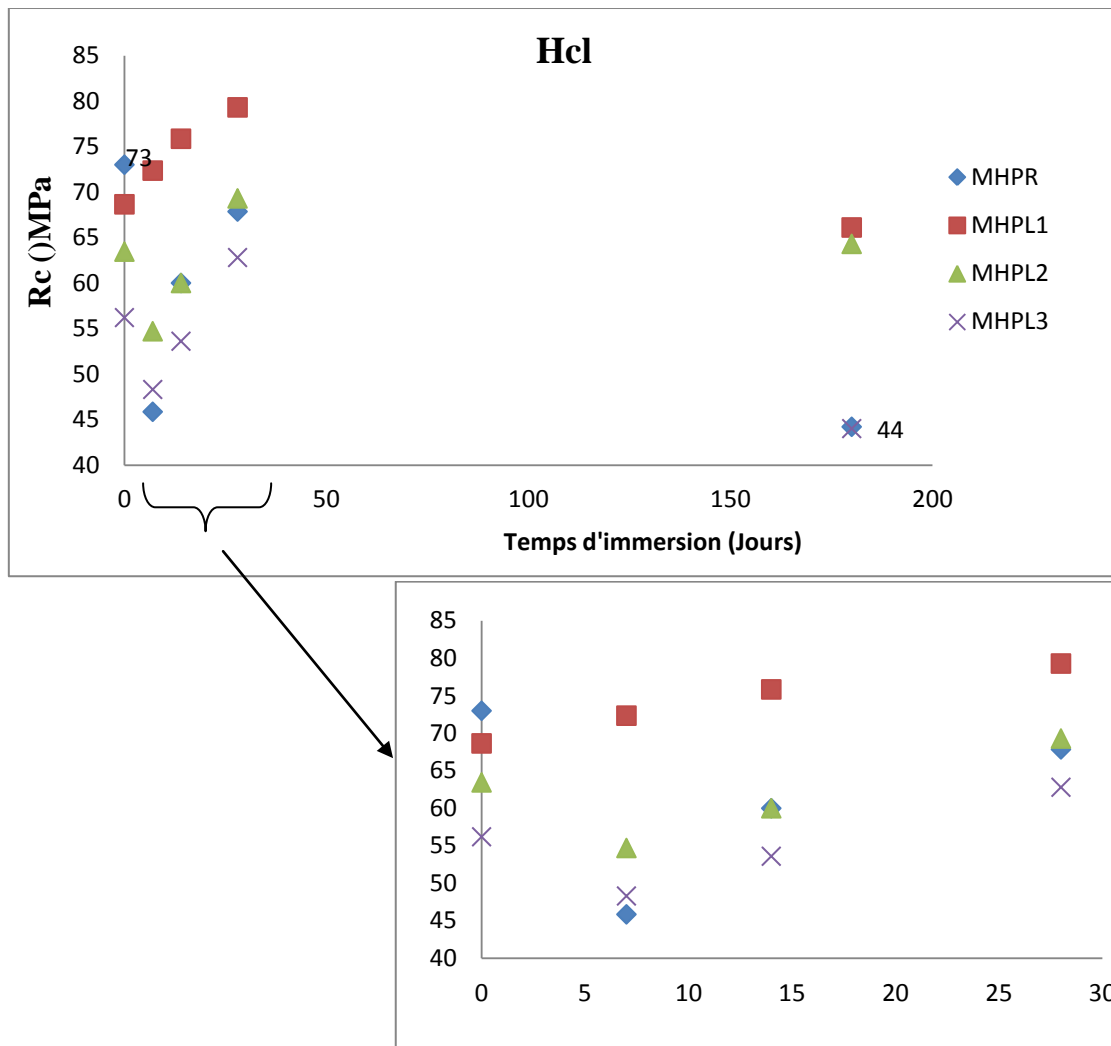


Figure 114. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans la solution Hcl

Plusieurs recherches ont déjà mis en évidence l'effet bénéfique des additions à caractère pouzzolanique sur la résistivité chimique des mortiers et des bétons. Selon [119], l'incorporation de fine naturelle à caractère pouzzolanique réduit les pores capillaires par remplissage de ces pores de gel CSH de seconde génération formé à partir des fines pouzzolaniques et la portlandite. Ce dernier hydrate est très sensible à l'acide puisqu'il est le premier hydrate à se dissoudre lors de la lixiviation.

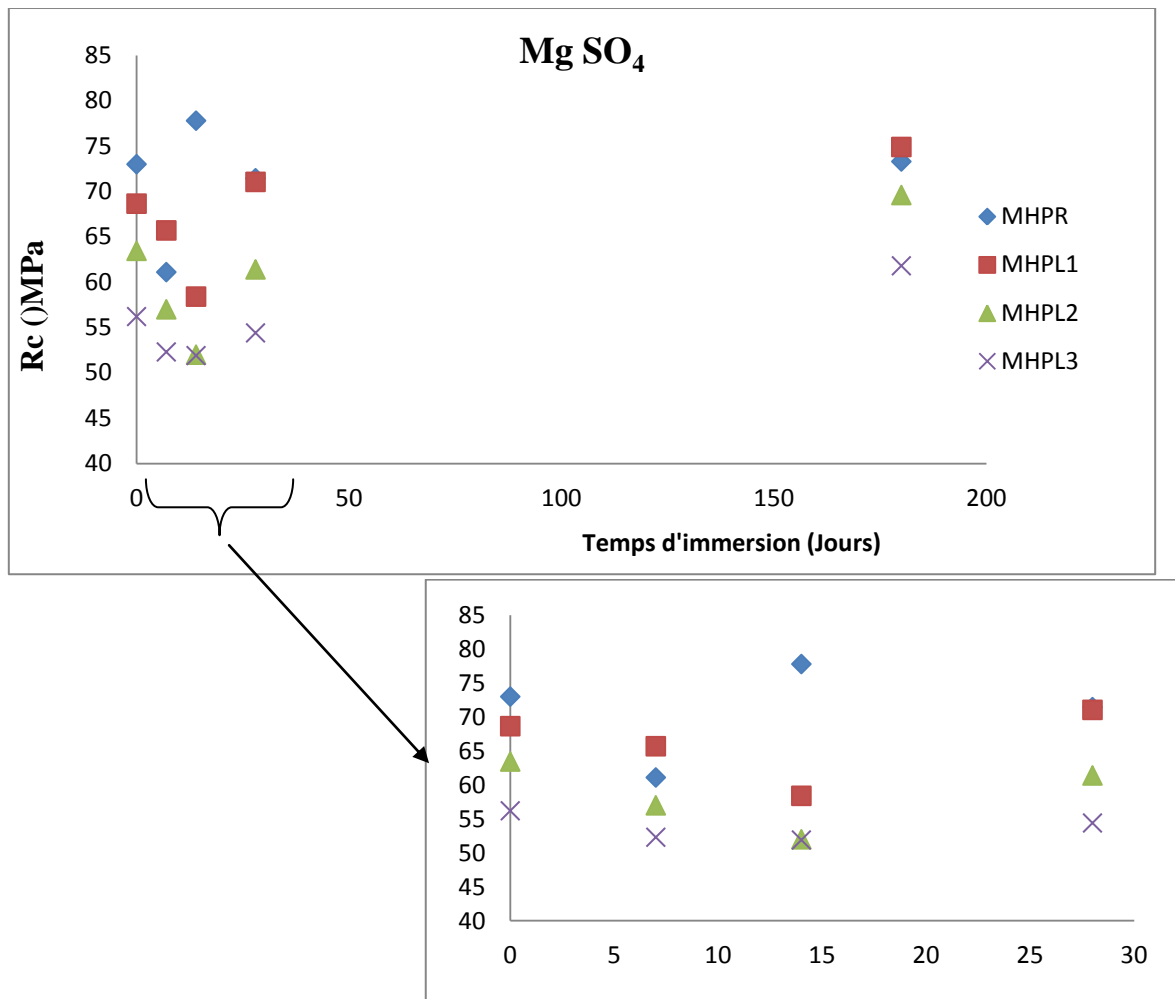


Figure 115. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans la solution $Mg SO_4$

Pour la figure 115 on remarque que tous les mortiers ont le même comportement ou la résistance diminue dans les 14 premiers jours d'immersion dans la solution $Mg SO_4$, puis elle augmente progressivement à 28 jours pour atteindre encore des valeurs supérieures à l'âge de 180 jours.

Cette diminution de la résistance peut être justifié par le changement du PH de la solution qui a affecté les constituants du ciment et a conduit à la formation des produits expansifs en consommant la quantité de C_3A (équations 23, 24 et 25) durant les premiers 14 jours, mais après les produits CSH dus à la réaction pozzolanique du verre ainsi que la quantité considérable de C_3S ont joué en faveur de cette résistance pour la faire augmenter progressivement.

D'après [100], Il est connu que l'attaque par les sulfates est minimisé lors d'un ajout de fines riches en silice dans les mélanges pour combler tous les vides interstitiels, et éviter la dissolution des CSH formés, l'augmentation du dosage en ciment pour augmenter la quantité des C_3S , la diminution du rapport E/L. En prenant également en considération la composition de notre Ciment CPA avec une très faible quantité de C_3A (6.6%) a joué un rôle favorable.

Après dégradation de 180 jours dans la solution $Mg SO_4$ les meilleures résistances mécaniques sont attribuées aux compositions nommées MHPL1 et MHPL2 avec 10 et 20% de PV progressivement qui dépassent leurs résistances avant immersion. Egalement les résistances des MHPR et MHPL3 ont des valeurs supérieures à celles d'immersion. Les mortiers avec PV ont une bonne résistance vis-à-vis de l'attaque par sulfate $Mg SO_4$.

Almeshal [95] à confirmé dans ses travaux que le remplacement du ciment par 10 % de PV cumule une résistance au nitrate d'ammonium NH_4NO_3 après 60 jours d'immersion meilleure que celle du mortier témoin sans PV.

De même [93] a révélé dans ces travaux que les mortiers avec 10 % de PV avaient un bon comportement contre l'attaque externe de solution Mg SO_4 et la perte de masse augmentait en augmentant la concentration de la solution (5% à 20%) après 60 jours d'immersion.

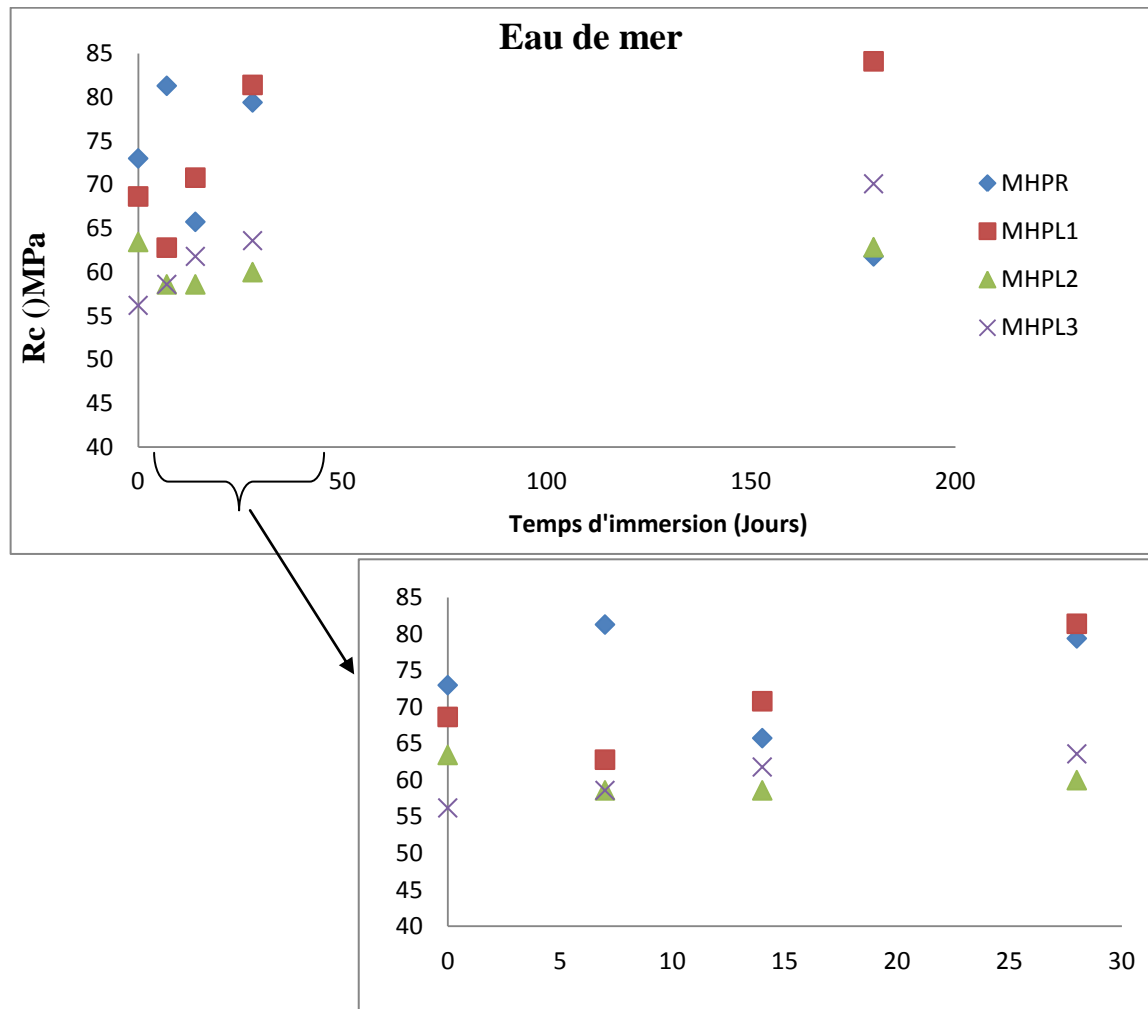


Figure 116. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans l'Eau de mer

L'analyse des résultats illustrés dans la figure 116 montre que la résistance à la compression des mortiers MHPL1 et MHPL2 conservés dans l'eau de mer diminue au cours des sept premiers jours mais se développe positivement entre 28 et 180 jours d'immersion.

La résistance du mortier sans PV noté MHPR est instable vue l'augmentation et sa diminution progressivement qui a atteint une chute de 30% de sa résistance initiale avant immersion dans l'eau de mer.

Cependant le MHPL3 semble avoir un comportement positif puisque sa résistance évolue en fonction du temps d'immersion, aucune chute de résistance n'a été signalé, mais toujours avec une résistance inférieure à celle du MHPL1 à 180 jours.

Notons que les sels dissous dans l'eau de mer sont principalement des chlorures et des sulfates. L'attaque du béton est le résultat de réactions séparées mais plus ou moins simultanées entre les sulfates et chlorures et les constituants du ciment [100]. La substitution (de Mg^{2+} par Ca^{2+}) s'effectue

également dans les silicates hydratés C-S-H qui se transforment progressivement en M-S-H, silicate de magnésium sans propriétés liantes, une formation qui a été limitée par la présence de la PV et le développement de son caractère pozzolanique a long terme [3].

Lorsque les ions chlore pénètrent dans la solution interstitielle, ils réagissent dans un premier temps avec le C₃A non hydraté pour former des monochloroaluminates (3CaO.Al₂O₃.CaCl₂.10H₂O), ce qui représente une modification positive de la microstructure du béton [Aïtcin cité par 7]

Nous pouvons constater que la résistance en compression du béton avec ajout est supérieure à celle de béton de contrôle indiquant que la PV contribue à la résistance en compression plus que ce que l'hydratation du ciment considéré seul pouvait apporter. La poudre de marbre densifie la matrice, ainsi à 180 jours de conservation la contribution liante de la PV est globalement 40% plus importante que celle du ciment CPA.

Notons que la finesse favorise l'effet physique de la PV, en effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons [120]

Afin de mieux comprendre et comparer l'effet de la substitution du ciment CEM I sans ajouts par la PV dans les quatre environnements, nous résumons les résultats de la résistance à la compression à 180 jours dans figure 117.

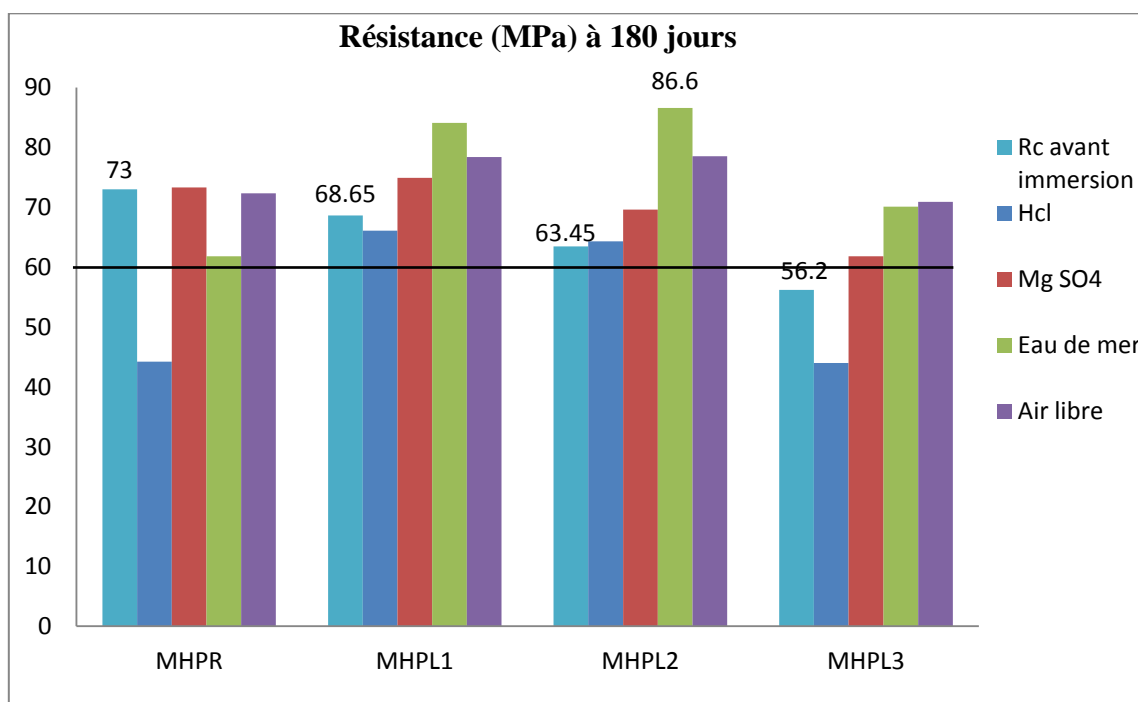


Figure 117. Comparaison des résistances à la compression à 180 jours de conservation dans les différents milieux.

La figure 117 montre que le remplacement du ciment CPA par la PV apporte un effet positif sur la résistance à la compression par rapport au mortier sans PV dans les milieux non agressifs, comme c'était le cas dans la conservation dans l'eau du robinet (figure 82).

Dans les quatre milieux de conservation la résistance du MHPL1 et MHPL2 dépasse nettement celle du mortier MHPR et qui avoisine la résistance du MHPL3 après 180 jours d'immersion et sont supérieures aux résistances avant immersion ce qui représente un gain de résistance prouvant alors le rôle de la PV dans la résistance aux agents agressifs.

Ces mortiers confectionnés à base de ciment CPA sans ajouts présente une bonne résistance encore renforcée par la présence de la PV puisque leurs résistances dépassent les 60MPa, rentrant toujours dans la gamme des MHP sauf pour le BHPR et BHPL3 avec des valeurs légèrement inférieures pour l'acide.

Une bonne résistance est signalé dans l'eau de mer, étonnement on s'attendait à une petite chute de résistance comme en littérature, le mortier MHPL2 a atteint une valeur de 86.6 MPa après 180 jours d'immersion ce qui représente un gain de 40% par rapport à sa résistance de 28 jours avant immersion. En comparant avec les résultats de la figure III. 8 on constate une différence de 3MPa à l'âge de 365 jours mais conservé dans l'eau du robinet.

L'ajout de 10% de PV est meilleur que le 20% dans l'attaque aux sulfates et acides, mais pour l'eau de mer et le milieu acide, l'ajout de 20% est plus favorisé.

Vis-à-vis de l'effet de conservation à l'air libre on remarque que les résistances ont le même comportement que les résultats de la figure 82 ou la substitution de 10 et 20% de PV a donné de meilleurs résultats en comparant avec 0% et 30% de PV, mais sont nettement inférieures, l'air libre ne favorise pas le développement des performances mécaniques des produits cimentaire, contrairement à la conservation dans l'eau riche en chaux libre tel que la résistance du MHPR à 180 jours à l'aire libre est presque égale à sa résistance à 28 jours mais dans l'eau du robinet.

2. Résultats des attaques sur béton

2.1. La variation de masse

La figure 118 illustre la variation de la masse à l'âge de 180 jours pour les quatre bétons confectionnés BHMR, BHPL1, BHPL2 et BHPL3 dans les trois milieux considérés à savoir : la solution acide Hcl, la solution sulfurique Mg SO₄et enfin l'eau de mer.

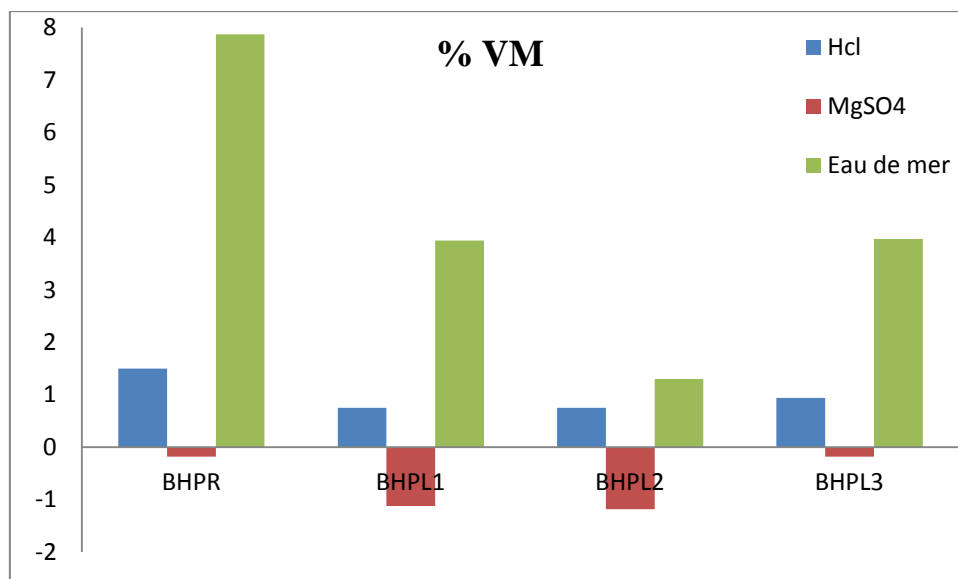


Figure 118. Variation de la masse des bétons immergés dans les différents milieux

Une perte de masse dominante dans l'eau de mer surtout pour le béton témoin sans PV le BHPR est remarqué avec une valeur de 8% mais qui reste toujours inférieure aux valeurs données en littérature concernant les bétons avec ajout de fines, une faible variation de masse est trouvé pour la conservation dans le milieu acide avec une valeur maximale pour le béton témoin toujours.

[94] a résumé qu'en immersion acide, les résultats de la résistance à la compression étaient cohérents avec la perte de masse, ou cette perte pour les mortiers avec PV était remarquablement inférieurs à

celle du mortier témoin en particulier celui avec 45% de PV, avec une différence de perte de masse de 15%.

Cependant un gain de masse est calculé pour les bétons conservés dans la solution $Mg SO_4$ avec des valeurs maximales de 1% pour les deux pourcentages de PV 10 et 20%.

D'après Zidol [48] ce gain de masse est le résultat d'expansion, cette expansion se traduit par une augmentation de la masse de l'échantillon. Les réactions qui se développent durant l'attaque par les sulfates conduisent principalement à la formation du gypse et de l'ettringite qui génère des expansions excessives. Cependant, le mécanisme par lequel, la formation de l'ettringite cause d'importantes expansions demeure encore un sujet controversé. La pression générée par la formation de l'ettringite et le gonflement dû à l'adsorption de l'eau dans un milieu alcalin par l'ettringite cristallin sont deux des nombreuses hypothèses généralement supportées par certains chercheurs [21].

Ces expansions ne sont pas remarquées au niveau de l'attaque du mortier par le $Mg SO_4$, différencié du béton par la présence des granulats dans ce dernier, ces résultats suggèrent que la poudre de verre contrôle efficacement les expansions dues à l'attaque par les sulfates dans les milieux cimentaires sans présence de granulats, mais en cas de leur présence la réaction alkali silice [3] se manifeste en contact avec ces derniers et se traduit par une expansion (gonflement) qui peut causer quelques fissures internes ou une certaine fragilité du béton vis-à-vis de la résistance mécanique.

2.2. La variation de la résistance à la compression

Cette dernière figure 119 illustre la résistance a la compression obtenue après conservation de 180 jours dans les trois milieux étudiés avec une comparaison faite par rapport à la résistance de ces bétons avant immersion.

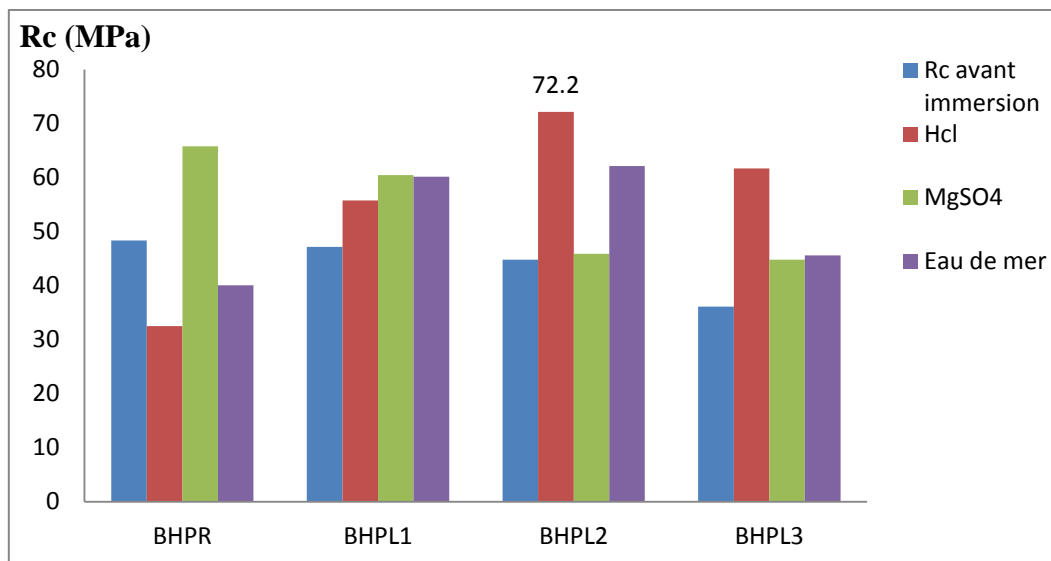


Figure III. 45. Comparaison des résistances à la compression à 180 jours de conservation dans les différents milieux.

Il est clair que les bétons avec et sans poudre de verre n'ont pas un comportement similaire aux mortiers sachant que le rapport E/L utilisé pour les deux produits est le même et égale à 0.35.

En général pour les trois BHP avec PV la résistance dans les trois milieux est nettement supérieure à leurs résistance avant immersion ce qui traduit le rôle mécanique et physique joué par la PV dans la durabilité des produits cimentaires et comme expliqué précédemment dans la partie du mortier.

La résistance du MHPR sans PV dans la solution $Mg SO_4$ dépasse celle des BHPL1, BHPL2 et BHPL3 correspondant au gain de masse signalé à la figure III.44 traduit par une expansion due à la réaction alcali silice du verre avec les granulats, ce qui a fragilisé le matériau et donc a chuté sa résistance face à l'attaque par les sulfates comparé au béton témoin.

Nos résultats pour le béton dans le milieu sulfurique qui sont en désaccord avec les résultats de [48] qui confirment que la poudre de verre contrôle efficacement l'expansion due à l'attaque par les sulfates et l'initiation ou la propagation de la corrosion induite par les chlorures ; son étude est faite pour un béton autoplaçant avec une quantité limitée de granulats remplacé par des fines de verre, à la concentration de la solution en $Mg SO_4$ et enfin à la nature du ciment utilisé ainsi que son dosage sans oublier bien sûr son rapport E/L élevé par rapport au notre.

Une étude menée par [92] en employant un ciment de sulfate avec ajouts de PV dans des solutions salines, a prouvé que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la proportion de poudre de verre, la résistance à la compression des échantillons immergés dans les solutions NaOH et NaCl sont les deux inférieures à celle d'une solution immergée dans l'eau. Aussi l'utilisation de ciment Portland résistant aux sulfates a rendu la résistance à la compression des échantillons immergés dans la solution de sel supérieure à celle de la solution de base, bien que l'ajout de verre provoque une réaction alcali-silice qui provoque la formation de gel de silice qui entraîne un gonflement et endommage le béton.

Notons également que l'agent agressif extérieur dont la diffusion à travers le béton est particulièrement intéressante est celle des ions chlore qui peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption) d'après [7].

Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs, Chekireb [54] a constaté qu'à l'âge de 91 jours, la résistance aux ions chlorures en présence de 20% de PV est nettement améliorée témoignant de la densification des matrices cimentaires binaires et ternaires, de nouveaux gels de C-S-H se forment et comblent les pores capillaires, le béton devient imperméable. Cela confirme la bonne performance de la PV pour réduire la pénétrabilité des ions chlorures dans les bétons autoplaçants de la même manière que dans les études antérieures pour les bétons ordinaires. [97] ont constaté une amélioration significative de la résistance aux ions chlorures des bétons contenant la poudre de verre et formulé avec un rapport E/L = 0,49. De même, Zidol [47] a noté une très faible pénétrabilité à 91 jours avec des bétons ordinaires de rapport E/L de 0,55 et une teneur en PV de 20 % et de 30 %.

Pour notre étude, on constate que ces BHP avec PV ont une très bonne résistance à l'attaque par acide HCl ou une valeur maximale de 72.2 MPa est atteinte par le BHPL2 avec 20% de remplacement de PV ce qui a diminué la quantité ciment (C_3A et C_3S) très sensible à l'acide HCl. Un gain de 24 MPa par rapport à sa résistance avant immersion et de 4MPa par rapport à sa résistance dans l'eau du robinet à l'âge de 365 jours.

L'attaque chimique des bétons s'effectue principalement sur la portlandite $Ca(OH)_2$ contenue dans le ciment d'après [119], l'ajout de la pouzzolane conduit à la consommation de cette portlandite ce qui contribue à la résistance de l'attaque sulfatique. En effet, la réaction pouzzolanique émise par PV conduit à la consommation de l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment qui réduit le potentiel de formation du gypse et de l'étringite secondaire. En outre, la présence de la pouzzolane naturelle dans le ciment, rend la microstructure plus dense suite à la formation de gels secondaires C-S-H et par la suite empêche la pénétration des agents agressifs.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de comparer l'effet de l'incorporation de la PV sur la résistance des bétons vis-à-vis des attaques acides Hcl sulfates $MgSO_4$ et l'eau de mer après une période d'immersion de 180 jours. Les principales conclusions que nous pouvons tirer sont :

L'incorporation de la PV dans les MHP et BHP améliore la résistivité envers l'attaque d'acide et sulfatique, la résistance des échantillons avec PV était meilleure que celle des produits témoin sans PV, avec des valeurs après 180 jours dépassant les valeurs de ces mêmes échantillons avant l'immersion.

L'examen visuel a permis de mettre en évidence l'état de chaque produit, très peu de dégradation a été observée sur les échantillons.

Les produits élaborés avec une substitution de 20% de PV ont donné les meilleurs résultats concordant avec les résultats de la résistance à la compression.

Le meilleur milieu de résistance pour le mortier était l'eau de mer ou le MHPL2 a développé un gain de 40% par rapport a sa résistance initiale et s'approchant de sa résistance a 365 jours dans l'eau du robinet.

L'ajout de la PV a fragilisé la résistance des BHP vis avis de l'attaque $Mg SO_4$ puisque la résistance était inferieure à celle du BHPR sans poudre de verre due essentiellement à l'expansion traduite par la réaction alkali silice du verre est expliqué par le gain de masse.

Les BHP avec PV ont une très bonne résistance à l'acide Hcl ou le BHPL2 a atteint une valeur dépassant sa résistance initiale et même sa résistance à 365 jours de conservation dans l'eau du robinet.

L'incorporation de la PV conduit en général à des performances très comparables, voire meilleures à celles des mortiers et bétons sans PV contre les attaques par Hcl, $Mg SO_4$ et l'eau de mer.

Conclusion Générale

Le premier objectif de la présente thèse consistait à contribuer de façon expérimentale à l'obtention d'une formulation de mortier et béton à haute performance (MHP et BHP) à base de déchet de verre économique répondant à des critères mécaniques maximales en service tout en alliant résistance mécanique, durabilité, coût et environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Nous avons évalué l'effet de la substitution de ciment sans ajouts CPA de classe 52.5 par de la poudre de verre PV finement broyée avec une finesse de Blaine de $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$ à des pourcentage variant entre 10, 20 et 30% par rapport à la masse du ciment, sur les propriétés à l'état frais et durci, ainsi que la durabilité chimique par attaques externes. Les rapports E/L et E/C étaient fixés à 0.35, cependant pour des besoins de comparaison nous avons procédé à travailler un autre type de ciment CPJ pour l'étude à l'état frais (temps de prise et consistance), également d'autres rapports E/L et E/C fixés à 0.5.

Les principales conclusions aux quelles nous sommes parvenues sont :

❖ Sur les caractéristiques et les propriétés à l'état frais

- Les caractéristiques minéralogique de la poudre de verre montrant que la somme $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 74,2 \% > 70\%$ ne constituent nullement un inconvénient à son emploi comme substituant au ciment, au contraire très riche en silice elle s'approche de la composition d'autres ajouts traditionnels tels la fumée de silice. Cependant les résultats obtenus montrent plutôt un effet favorable conformément aux résultats de certains auteurs qui conviennent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique si elle est utilisée sous forme de poudre.
- Les délais de prise augmentent avec l'augmentation du pourcentage de PV qui réduit habituellement la demande d'eau, ainsi la consistance diminue avec la teneur en PV, suggérant un excès d'eau due à la différence de surface spécifique entre la PV et le ciment CPA, de ce fait un intérêt de la manœuvre en cas de bétonnage par temps chaud.
- L'étalement du ciment CPJ dépasse celui du ciment CPA avec ou sans PV s'accordant également avec les résultats des temps de prise obtenus.
- La consistance du ciment CPA reste supérieure a celle du ciment CPJ pour les pates sans et avec PV, une idée sur la nature des fines ajouts employées lors de la production du ciment CPJ: les fines ajouts ont une faible demande en eau.

- la différence de finesse entre la PV et le ciment a affecté la masse volumique du béton BHP à l'état frais vu que la masse volumique de la PV est inférieure à celle du ciment qu'on a substitué, donc elle diminue avec de l'augmentation du pourcentage de PV.
- L'ouvrabilité des BHP et BO augmente avec l'augmentation du pourcentage de substitution de PV pour tous les rapports E/L soit de 0.35 ou de 0.5.
- l'affaissement des BO formés avec un dosage de 400 kg/m et un E/L égale à 0.5 est supérieur à ceux des BHP formés avec un dosage plus grand et moins de quantité d'eau, également l'affaissement est plus considérable avec le rapport E/L que le rapport E/C, donc la PV avec la finesse utilisée a peut de demande en eau.
- Selon les résultats d'affaissement obtenus, les BHP sont classés comme étant des bétons fermes et les BO comme étant des bétons très plastiques.

❖ **Sur les propriétés mécaniques à l'état durci**

- L'indice d'activité pozzolanique à 28 jours avec un pourcentage de PV, **P = 25%** de substitution de ciment CPA dépasse les 67% confirme que la PV est un matériau pozzolanique selon la norme en vigueur. Cet indice augmente en fonction du temps de durcissement pour les mortiers élaborés, Il passe à un maximum obtenu de 112,7 % à 365 jours pour le mortier MHPL2, attribué au développement de la réaction pozzolanique à long terme de la PV.
- La PV améliore les résistances mécaniques à court et à long terme, ces dernières ayant tendance à se stabiliser au-delà de 28 jours, à savoir qu'entre 7 et 28 jours la résistance des mortier avec PV est plus faible que celle des témoins sans PV, en revanche à partir de 90 jours de durcissement, l'addition de 10% ou 20% de PV améliore cette résistance pour atteindre des valeurs supérieures à celles des témoins, principalement par effet hydraulique et pozzolanique exercés par la finesse supérieure de la PV à celle du ciment CPA développant plus de C-S- H dans le temps pour donner les meilleurs résultats.
- La résistance à la compression des mortiers à base de ciment CPJ est inférieure à celle des mortiers à base de ciment CPA en raison de toutes les additions considérées lors de la fabrication du ciment CPJ dans les cimenteries comme indiqué par la composition chimique des deux ciments.
- A tout âge les mortiers substitués de 10 et 20% de PV développent une résistance à la flexion supérieure à celle du mortier témoin sans PV le MOPV, un comportement identique à celui de la résistance à la compression.

- En terme de rendement mécanique à long terme (365 jours), les résultats des rapports E/L et E/C fixés à 0.35 sont meilleurs que ceux des rapports E/L et E/C fixés à 0.5, l'excès d'eau de gâchage affecte négativement le développement des performances, d'où l'utilisation des nouvelles formulations de béton à haute performance est utile en travaillant avec des superplastifiants réducteur d'eau. Correspondance faite pour le rapport fixé à 0.5 en travaillant avec le E/C les résultats dépassaient ceux du rapport E/L.
- L'accélération du durcissement par étuvage a affecté la résistance a court et long terme de tous les mortiers avec des valeurs inferieures à celle obtenues en conservation dans l'eau du robinet.
- La meilleure résistance à la compression est obtenue pour le MHP et BHP en travaillant avec le rapport E/L et non avec le rapport E/C, donc en considérant notre liant L la somme entre ciment et PV ou la PV est substituée comme remplacement partiel du ciment et non comme ajouts cimentaire lorsque nous avons considéré le rapport E/C.
- Le meilleur taux de remplacement du ciment par la PV était de 20% suite aux résultats obtenus de la résistance en compression pour le mortier MHPL2 et béton BHPL2, néanmoins on ne peut négliger le résultat obtenu avec 30% de remplacement du ciment par la PV qui est légèrement inferieur aux témoins sans PV, présentant un gain en matière de ciment favorable aux rendements des entreprises productrices des produits à base de ciments.
- Les ajouts cimentaires considérés lors de la fabrication et la production du ciment CPJ qui peuvent varier en masse de 0 à 35 % ont influencé le comportement des mortiers avec PV à court et surtout a long terme, résultant des résistances moyennement faibles par rapport a celles obtenues en travaillant avec le ciment sans ajouts CPA (95% clinker +5% gypse) pour les deux rapports E/L=0.35 et E/L=0.5.
- la résistance à la compression est commandée par la valeur du rapport E/L, tel que pour 0.35, avec une réduction de 43 litres L/m^3 d'eau de mélange conduit à une augmentation de 10 à 20% de la résistance à la compression.
- Concernant la vitesse de propagation d'onde ultrasonique, VU augmente en fonction du temps de durcissement des bétons car le volume des pores capillaires dans la pâte de ciment hydraulique diminuent avec le temps (l'air freine les ondes ultrasoniques), prouvé par les vitesses élevées des BHP avec PV par rapport au témoin ou la finesse

de la PV a comblé ces pores par effet de remplissage et la réaction poozolanique (création des produits C-S-H).

- les VU des BHP formulés avec E/L et E/C = 0.35 sont supérieurs aux BO formulés avec E/L et E/C = 0.5, s'accordent avec les résultats des résistances à la compression à 365 jours. De même la meilleure VU est obtenue pour une substitution de 20% de PV prouvant encore une fois que la substitution de 20% du ciment par la PV avec un rapport limité de E/L=0.35 donne les meilleurs résultats.
- L'ensemble des BHP à 365 jours rentre dans la gamme d'excellente qualité puisque les VU dépassent les 4500m/s, ce qui prouve que les bétons sont denses et de meilleures qualités.
- L'analyse des corrélations a montré une faible corrélation entre la VU et la masse volumique des BHP, liée à la différence de base des masses volumiques et la finesse du ciment CPA et la PV, par contre une forte corrélation positive entre VU et la résistance à la compression.
- La PV diminue la porosité du BHP en associant avec la matrice cimentaire par rapport au BHP témoin, elle diminue de sa masse volumique et augmente la connectivité des pores dans le béton ce qui augmente la VU.
- L'estimation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son représente une certaine fiabilité quelque soit le type de béton et explique la réalité du comportement de béton suivant l'âge et la position.
- L'analyse au microscope électronique à balayage MEB nous a permis de constater une différence significative au niveau de la microstructure du BO et celle du BHP, ainsi que celle des bétons avec ou sans PV. Les images de ces derniers ont révélé une structure interne dense et compacte des produits d'hydratation (C-S-H), une texture très dense, compacte avec de gros cristaux en comparaison à celle du béton ordinaire ou sans PV. Grace à leur texture et microstructure spécifiques, les BHP avec 20% de PV s'accordent avec les résultats des VU et de la résistance à la compression.

❖ **Sur la durabilité par attaque chimique externe**

→ **Examen visuel** : Il faut noter que même après 180 jours de conservation dans les milieux plus ou moins agressifs, les caractéristiques mécaniques de ces bétons à hautes performances ne sont pas affectées par les dégradations probablement grâce à la très faible porosité en présence de la PV, qui est un frein à la pénétration des agents agressifs.

→ **Mortier :**

- La variation de masse des mortiers avec PV est inférieure aux témoins sans PV après 180 jours d'immersion dans les trois milieux mais elle est plus significative dans la solution Hcl.
- La profondeur de dégradation des échantillons immergés dans la solution acide est plus grande que celle des échantillons immergés dans la solution sulfate avec des valeurs plus importantes pour les MHPR contre ceux avec PV.
- A 180 jours, dans le milieu Hcl et $MgSO_4$ les mortiers avec 10 et 20% de PV ont développé de meilleures résistances en comparant avec le témoin sans PV, dépassant même leurs résistances initiales avant immersion, la PV confirme encore que son ajout a un effet positif contre les attaques acides et sulfatiques dans les milieux cimentaires. La perte en résistance du mortier MHPR est estimée à 41% de sa résistance initiale d'immersion en milieu Hcl.
- Un très bon comportement également est observé vis-à-vis de l'eau de mer puisque les résistances ont augmentées; l'ajout de 20% de PV est toujours meilleur que les autres; de sorte qu'un gain de 40% par rapport à sa résistance de 28 jours avant immersion est enregistré, de même avec une différence de 3MPa à l'âge de 365 quant il a été conservé dans l'eau du robinet.
- L'air libre ne favorise pas le développement des performances mécaniques des produits cimentaire, contrairement à la conservation dans l'eau riche en chaux tel que la résistance du MHPR a 180 jours à l'aire libre est presque égale à sa résistance à 28 jours mais dans l'eau du robinet.

→ **Béton :**

- Une perte de masse des BHP considérable est obtenue pour l'attaque par eau de mer par rapport au milieu Hcl, contre un gain de masse dans la solution $Mg SO_4$ due essentiellement à l'expansion par la réaction alkali silice créé principalement à la présence de granulats dans la matrice cimentaire (un gain non observé pour les MHP). Les BHP avec PV ont des valeurs de perte inférieures et de gain supérieurs en comparant avec les BHPR.
- Après 180 jours d'immersion dans les trois milieux, la résistance des BHP avec PV est nettement supérieure à leurs résistances avant immersion, ce qui traduit le rôle mécanique et physique joué par la PV dans la durabilité des produits cimentaires et comme expliqué précédemment dans le dernier chapitre de la troisième partie.

- Dans le milieu $Mg SO_4$ la résistance du BHPR était meilleure que les autres avec PV expliqué par la présence d'alcalin dans la poudre de verre qui réagissent avec les granulats de la matrices cimentaire d'où la réaction alkali silice de la poudre de verre signalé par plusieurs auteurs dans leurs travaux de recherche.
- Les BHP avec PV développent de très bonnes résistances contre l'attaque acide par HCl, avec un gain de 24MPa par rapport a sa résistance initiale avant immersion, atteinte toujours par la substitution du ciment CPA par 20% de PV, dépassant encore la résistance de ce même BHP à 365 jours de conservation de un milieu saint (l'eau du robinet).

PERSPECTIVE

- Il semble qu'une étude rhéologique donnera de meilleures espérances pour évaluer la quantité minimale d'eau que chaque mélange demandera pour chaque rapport étudié (déterminer les seuils de cisaillement et la saturation en superplastifiant)
- D'après les résultats obtenus le meilleur taux de substitution du ciment par la PV pour les BHP élaborés est 20% (entre 20 et 30% vue que les résultats du remplacement par 30% sont légèrement inférieur et à ceux de remplacement par 20%), mais pour l'indice d'activité pozzolanique le remplacement par 25% est meilleur que le 20% de PV, il semble très intéressant de chercher le seuil limite du pourcentage de remplacement pour espérer encore d'augmenter ces résultats obtenus.
- L'analyse des résultats en terme de résistance (essentiellement pour la perte de résistance à la flexion des mortiers entre 28 et 365jours) montre qu'il y'a des produits formés lors de la réaction entre le verre et la chaux qui serait probablement des silicates de calcium hydraté (CSH) et qui se développe a long terme (365 jour) chose qui peut être confirmé par des essais d'analyse DRX et l'ATG pour compléter d'analyse de la microstructure, qui n'as pas été mené a son dernier terme vis a vis des attaques chimiques pas agents (panne technique du microscope électronique à balayage survenue au laboratoire de chimie de l'UMMTO).
- Un autre point très important, les vitesses du son VU sont déterminées à partir des faces de coulage et des faces opposées des cubes ayant subi une conservation dans l'eau, donc au départ la face de coulage perd une quantité d'eau plus grande que la face opposée et ne permettant pas une hydratation similaire de même ordre dans toutes les faces, pour cela une évaluation dans les autres faces aurait été nécessaire a faire pour mieux évaluer cette VU.

- Remplacer l'eau de gâchage par l'eau de mer dans la confection des mortiers avec poudre de verre pour voir le développement des résistances, puisque ces derniers ont développés de très bonnes résistances après 180 jours d'immersion dans l'eau de mer.
- Il faut se rappeler que le verre utilisé dans notre étude est essentiellement issue des la récupération de bouteilles de couleur vertes, il ne contient ni de chrome ni de lithium, éléments principaux qui peuvent réduire le développement des réactions alcali-silice dans le béton. Possibilité de faire la substitution par un mélange de déchet de verre (bouteilles, plat, avec un mélange de couleur).
- Utilisation d'autre types de ciment tels le ciment de sulfates ou d'aluminates conjointement avec la poudre de verre dans les BHP pour augmenter sa résistance au sulfates.
- Introduction des fibres dans ce type de BHP avec augmentation du dosage en ciment, ajouter également la fumée de silice à coté de la poudre de verre pour produire un béton à ultra haute performance fibré BUHPF.

ENFIN

L'objectif d'atteindre des résistances dépassant les 60 MPa pour le béton BHP en remplaçant une quantité de ciment CPA par la PV en travaillant avec des produits locaux est atteint largement avec un gain de résistance et une économie du ciment sans oublier la préservation de l'environnement en réduisant le taux de CO₂ dégagé dans l'air par les cimenteries. La poudre de verre peut compléter efficacement le ciment due à la formation du C-S-H secondaire entraînant une densification de la pâte de ciment durcie par le remplissage des pores, faisant des matrices imperméables si bien que les ions acides et sulfates ne peuvent pénétrer facilement comme dans le cas des bétons témoins à base de ciment portland seulement. Cette contribution structurelle se manifeste par la réduction de la porosité et par conséquent une plus grande résistance à l'attaque chimique traduisant leur caractère durable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aitcin P C. (2004). High-Performance Concrete. Taylor & Francis e-Library. 621p.
- [2] Mladenka S C et AITCIN P C. (2003). Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice. Canadian Journal of Civil Engineering. CNRC Canada. Vol 30. p.414–428.
- [3] Idir R. (2009). Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. Thèse de doctorat en cotutelle. INSA de Toulouse, France – l'Université de Sherbrooke, Canada. 292 p.
- [4] Tricentris. Valoriser le verre mixte dans le béton. article du 11 juillet 2016 par Marie Gagnon. <https://www.tricentris.com/revue-de-presse>.
- [5] Niang A, Roy N, Tagnit-Hamou A et Bengougam K. (2012). Comportement en compression de poteaux en béton armé incorporant de la poudre de verre, Groupes Béton et Structure, Université de Sherbrooke, Canada.
- [6] Ben Messaoud Sabah. (2018). Analyse Expérimentale Du Comportement Des Bétons À Hautes Performances Légers (BHPL). Thèse de doctorat Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- [7] Chaid R. Jauberthie R. Talah A. Action de l'eau de mer sur la durabilité des bétons de poudre de marbre. INVACO2 : Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction N° : 1O-018 Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011
- [8] Diapason. R&D de haute performance sur les bétons. Avril 2009. www.usherbrooke.ca/lereseau/genie/diapason.html
- [9] Kosmatka S H, Kerkhoff B, Panarese W C, Norman F et McGrath R J. (2003). Dosage et Contrôle des Mélanges de Béton, EB101, 7e édition, Association Canadienne du Ciment, Ottawa, Ontario, Canada, 368 p.
- [10] Ferraris C F et Lobo C L. (1998). Processing of HPC. Concrete International. Vol 20. Issue: 4. P 61-64.
- [11] Les Bétons Spéciaux. (2005). TBA 1022. Article Techniques de l'Ingénieur. 64 p. <https://doi.org/10.51257/a-v1-tba1022>
- [12] Fiches techniques. (2006). Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre. CIM Béton. Tome 2. 134 p.

- [13] Mędala M. (2005). Etudes des interactions entre les phases minérales constituant le ciment portland et des solutions salines concentrées. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne. France. 146p.
- [14] Perez J F. (2002). Etude de l'hydratation des phases constitutive d'un ciment Portland et de la résistance mécanique des pates pures et mortiers: Influence des trialcanolamines. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne. France. 174 p.
- [15] Zeroub H. (2012). Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale). Mémoire de magister. Université de Boumerdes. Algérie. 117 p.
- [16] Sedan D. (2007). Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. Thèse de doctorat. Université de Limoges. 137p.
- [17] Moundougou I. (2010). Une étude de faisabilité pour une meilleure utilisation dans le matériau béton de granulats « potentiellement réactifs » vis-à-vis de la réaction alcali-silice. Thèse de doctorat. Université de Lille. France. 260 p.
- [18] Dreux G et Festa J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants. 8eme édition. Eyrolles.
- [19] Makani A. (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. France. 298 p.
- [20] De Sa C. (2008). Etude hydromécaniques et thermo mécanique du béton. Influence des gradients et des incompatibilités de déformation. . Thèse de doctorat. Ecole normale supérieure de Cachan. France. 211 p.
- [21] Mehta P K et Monteiro P J M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties and Materials. Third edition. Mc Graw-Hill.
- [22] Elalaoui O. (2012). Optimisation de la formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde. Thèse de doctorat. Université de Cergy-Pontoise et Ecole nationale d'ingénieur de Tunis. 194 p.
- [23] Chaid R. (2006). Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat. Ecole nationale polytechnique. Algérie. 175 p.
- [24] Boucetta T A. (2014). contribution du laitier granulé et de la poudre de Verre sur les propriétés d'écoulement et de Durabilité des bétons autoplaçants et de hautes Performances. Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar. Algérie. 224 p.

- [25] Documents scientifiques et techniques. (2008). Recommandations pour l'emploi des bétons autoplacants. AFGC. 64 p.
- [26] Behim M, Boucetta TA. (2013). Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplacants. Déchets Sciences et Techniques. N65. p.20-28.
- [27] Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A. (2010). Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Etude des propriétés des bétons de verre. Technologies Valorisation. 16. P. 70-77.
- [28] Messaoudi F, HAddad O, Bouras R et kaci S. (2015). étude du comportement rhéologique des pâtes autoplacantes marbrées. Annales du bâtiment et des travaux publics. p.16-24.
- [29] Siddique R, Iqbal khan M. (2011). Supplementary Cementing Materials. Engineering Materials. Springer.
- [30] Benkaddour M, Kazi-Aoual F, Semcha A. (2009). Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. Revue Nature et Technologie. N° 01. P.63-73.
- [31] Lakhal R. (2011). Elaboration des bétons à hautes performances 0 base des sous produit locaux formulation et caractérisation physico-mécanique. Mémoire de magister. Université Badji Mokhtar. Algerie. 117 p.
- [32] ERCE – CTC-Est – GRANITEX. (2004). Les Adjuvants – Définitions et opportunités d'utilisation. Journée d'information : ciments – bétons – adjuvants. 23 p.
- [33] Adjoudj M, K. Ezziane K. (2010). Perte d'efficacité d'un superplastifiant en présence d'un ciment composé et sous une température élevée. Symposium International sur la Construction en Zone Sismique. Université de Chlef (Algérie).
- [34] Ben Messaoud S, Bouzidi M. (2011). Formulation des bétons à hautes performances. Revue de génie industriel. N 6. p. 4-15.
- [35] Documents scientifiques et techniques. (2002). Bétons fibrés à ultra-hautes performances. AFGC. 155p.
- [36] Guide techniques. (2003) Valorisation des bétons à hautes performances dans les piles et pylônes de grande hauteur des ouvrages d'art. LCPC.108p.
- [37] De Larrard (). Structuration granulaire et formulation des bétons. N° OA 34. LCPC. 414p.
- [38] Holcim (Suisse) SA. (2011). Données techniques et recommandations pratiques. Béton fibré à ultra-hautes performances. Produit et applications. www.holcim.ch

- [39] Aitcin P C. Neville A. Acker P. (1998). Les différents types de retrait du béton. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - RÉF. 4184. p. 41-51.
- [40] Bentalha-Malou M. (2007). Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone –Microstructure. These de doctorat. Université de Constantine. 169p.
- [41] Chergui N. (2010). Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux. Mémoire de Magister. Université de Tizi Ouzou. 82p.
- [42] Achoura D, Bouterfa M. (2011). Effet du dosage en fibres métalliques ondulés sur le comportement mécanique des bétons à haute performances. INVACO2 : séminaire international, innovation & valorisation en genie civil & matériaux de construction. Rabat – Maroc
- [43] Djebaili R. (2012). Etude d'un béton à haute performance à base de sable de dune destinés aux ouvrages en milieu agressif et très agressif. Mémoire de magister. Université de Ouargla. Algérie. 105p.
- [44] Ali M H. Dinkha Y Z. Haido J H. (2016). Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders, Engineering Science and Technologie, an International Journal. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.004>
- [45] Walczak P. Malolepszy J. Reben M. Rzepa K. (2015) Mechanical properties of concrete mortar based on mixture of CRT glass cullet and fluidized fly ash. Procedia Engineering. 108. P. 453 – 458.
- [46] Pereira de Oliveira L A, Castro Gomes J. Santos P. Optimization of pozzolanic reaction of ground waste glass incorporated in cement mortars. University of Beira Interior, Covilhã, Portugal. Article in Press.
- [47] Zidol A. (2009). Optimisation de la finesse de la poudre de verre Dans les systèmes cimentaires binaires. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke. Canada. 168 p.
- [48] Zidol A. (2014). Durabilité en milieux agressifs des bétons contenant de la poudre de verre. These de doctorat. Sherbrooke. Canada, 234 p.
- [49] Tuan B L A, Hwang C L, Lin K L, Chen Y , Young M P. (2013). Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. Construction and Building Materials. 47. P. 334–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.039>
- [50] Danilova M.(2012). Effet de la poudre de verre sur le fluage du C-S-H. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke. Canada. 324p.

- [51] Ganjian E, Jalull G, Sadeghi-Pouya H. (2015). Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks *Construction and Building Materials*. 77. p. 270–275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.048>
- [52] Saribiyik M, Piskin A, Saribiyik A. (2013). The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties. *Construction and building materials*. 47. P.840-844.
- [53] Yu R, van Onna D V, Spiesz P, Yu QL, Brouwers H J H. (2015). Development of Ultra-Lightweight Fibre Reinforced Concrete applying expanded waste glass. *Journal of Cleaner Production*. Article in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.082>
- [54] Chekireb S. (2015). Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant. Mémoire de maitrise. Université de Sherbrooke. Canada. 138p.
- [55] Yu X, Tao Z, Song T Y. (2014). Material properties of concrete with different types of aggregates. In ST Smith (ed.), 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), vol. I, Byron Bay, NSW, Southern Cross University. Lismore. NSW. p. 231-236.
- [56] Bhandari P. S., Tajne K. M., (2013) Use of waste glass in cement mortar. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3(4), p. 704-711. <https://doi.org/10.6088/ijcser.201203013064>
- [57] Krati G, Kansal R. (2016). Effect of waste glass powder on properties of concrete: a literature review. *International journal of science and research (IJSR)*. 5. P.1329-1333.
- [58] Widodo K, IKA B, Budi S. (2015). Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute. *Procedia Engineering* . 125. P. 617 – 622. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.
- [59] Shekhawat B S, Aggarwal V. (2014). Utilisation of Waste Glass Powder in Concrete— A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*. 3. P. 14822- 14826.
- [60] Walczaka P, Małolepszyb J, Rebenb M, Szymański S, Rzepa, K. (2015). Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete. *Procedia. Engineering*. 122. P. 302 – 309.
- [61] Sadiqul Islam G M, Rahman M H, Kazi N. 2017. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 6. P. 37–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2016.10.005>
- [62] Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A. (2011). Potential pozzolanicity of glass cullet fines and aggregates. In *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*. No. 1, p. 28-34.

- [63] Bouzoubaâ N. Lachemi M. (2001). Self Compacting Concrete Incorporating High-Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results Cement and Concrete Research. 31. p. 413-420.
- [64] Sarkolzahi M. (2005). Optimisation du verre mixte dans le béton de qualité. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke. Canada. 97p.
- [65] Emam Ali E. Al-Tersawy S H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. Construction and Building Materials. 35. P.785–791. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- [66] Degirmenci N, Yilmaz A, Cakir OA. (2011). Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar. Indian J Eng Mater Sci. 18. P. 303-308.
- [67] Shao Y. Lefort T. Moras S. et Rodriguez D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research, vol.30, n° 1, p.91-100.
- [68] Limbachiya M. Meddah M S. Fotiadou S. (2012). Performance of granulated foam glass concrete. Construction and building materials. p.759-768. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.052](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.052)
- [69] Topcu I B. Canbaz M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. Cement and concrete research. 34. P. 267-274. [doi:10.1016/j.cemconres.2003.07.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003)
- [70] Aladdine, F. (2009). Propriétés mécaniques et durabilité des bétons incorporant le verre finement broyé. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke. Canada. 124p.
- [71] Schwarz N, Cam H, Neithalath N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. Cement and Concrete Composites. 30. P 486-496.
- [72] Schwarz N. et Neithalath N. (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, Cement and Concrete Research, vol.38, n° 4, p.429-436. [doi:10.1016/j.cemconres.2007.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.12.001)
- [73] Le recyclage du verre au Québec L'apport de Tricentris. Article de presse
- [74] Farshad Rajabipour M. ASCE; Maraghechi H; and Fischer G. Investigating the Alkali-Silica Reaction of Recycled Glass Aggregates in Concrete Materials. Journal of Materials in Civil Engineering. 22. P. 1201-1208.
- [75] A la santé de la planète. La valorisation de la chaîne du verre. Article de presse N 11. 2012.
- [76] Zeghichi L., Mezghiche B., Benghazi Z., (2012) Contribution à l'étude des propriétés du ciment blanc et compos. Communication Science & Technologie. 10. p. 27-35.

- [77] Boucheneb Y, Mehaddene R, Kemer H. (2023). Experimental characterization of the mechanical properties of concrete based on glass-powder. *Journal of Applied Engineering Sciences* 13. p. 27-38.
- [78] Guillon E. (2004). Durabilité des matériaux cimentaires - Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles. Thèse de doctorat. École Normale Supérieure de Cachan. 176 p.
- [79] Arroudj K. Zenati A. Oudjit MN. Bali A. Tagnit-Hamou A. (2011). Reactivity of fine quartz in presence of silica fume and slag. *Engineering*.3. P. 569-576.
- [80] Taylor H F W. (1997). *Cement Chemistry*. 2nd édition. 469 p.
- [81] Stoica O M. (1996). Production d'éléments fabriqués en béton de poudres réactives. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke. Canada. 121 p.
- [82] Shinde R. (2014). Utilization of Glass Powder and Fly Ash In Concrete Production. *International Journal for Scientific Research & Development*. 2. P. 1063-1066.
- [83] Abdallah A H. (2012). Optimisation et Performance des Bétons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke. Canada. 187.
- [84] Belaribi O. (2015). Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem. Algérie. 175p.
- [85] Documentation Technique. T 93. Les bétons et les ouvrages en site maritime. CIM béton. www.infociments.fr
- [86] Divet L. (2001). Les réactions sulfatiques internes au béton: Contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite. *Ouvrages d'art OA 40*. LCPC. 237p.
- [87] John B. S and Ramón L. C. (1999). Evaluating performance-based test and specifications for sulfate resistance in concrete. *Research Report Number 1706-3*. 182p.
- [88] Khelifa R. X Brunetaud. Chabilh. AL-Mukhtar M. (2008). Conséquences mécaniques de l'attaque sulfurique externe sur les bétons autobloquants. *Sciences & Technologie*. N°28. p 23-28.
- [89] Badogiannis E. Kakali G, Dimopoulou G. Chaniotakis E, Tsivilis S. (2005). Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. *Cement & Concrete Composites*. 27. 197–203.
- [90] Guide d'utilisation du béton en site maritime. Notice n° PM 08-01. 135p. www.cetmef.developpementdurable.gouv.fr
- [91] Muhta P K. (2003). *Concrete in the marine environment*. Taylor & Francis Books, Inc.216 p.

- [92] Al Majeed EA (2018) Influence of Waste Glass Powder on Compressive Strength of Sulfate Resistance Portland cement. *Industrial Engineering and Management*. S3: 003. DOI: [10.4172/2169-0316.S3-003](https://doi.org/10.4172/2169-0316.S3-003)
- [93] Tayeh B A, Al Saffar D M, AadI A S, Almehsal I. (2020). Sulphate resistance of cement mortar contains glass powder. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 32. P. 495–500. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.07.002>.
- [94] Siad H. Lachemi M. Sahmaran M. Anwar Hossain K M. (2016). Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 113. P. 163–173.
- [95] Almehsal I, Al-Tayeb M M , Qaidi S M A, Abu Bakar B H, Tayeh B A. (2022). Mechanical properties of eco-friendly cements-based glass powder in aggressive medium. *Materialtoday: Proceedings*. 58. P. 1582-1587. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.613>
- [96] Frohard F. (2014). Durabilité des éco-bétons: Impact des additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés. Thèse de doctorat en co tutelle. Université Paris-Est et Université de Sherbrooke. 307p.
- [97] Shayan A et Xu A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cement and Concrete Research*, vol.36, n° 3, p.457-468. doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.012
- [98] Feldman R.F (1977) : Essais non destructifs du béton. Institut de la recherche en construction. Canada. <https://doi.org/10.4224/40001033>
- [99] Whitehurst E A. (1951). The Soniscope - a Device for Field Testing of Concrete. *Journal Proceedings*. Purdue University P. 105-115.
- [100] Durabilité et réparations du béton. GCI 714. Université de Sherbrooke. P. 160-185.
- [101] Gérard BERNIER. (2004). Formulation des bétons. C2210. Techniques de l'ingénieur. 31p.
- [102] Adaway M et Wang Y. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 14. P. 116-122.
- [103] Shi C. wu Y. Riefler C. et Wang H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powder, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 5, p.987-993.
- [104] Amin M, Saad Agwa I, Mashaan N, Mahmood S, Mahmoud H. (2023). Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High

- Performance Concrete with Recycled Waste Glass Abd-Elrahman. *Sustainability*. 15. 3085. <https://doi.org/10.3390/su15043085>.
- [105] Malhotra V M and Carino N J. (2004). *Nondestructive testing of concrete*. Second edition. CRC press. 365p.
- [106] Solis-Carcano R. Moreno E I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*. 22. P. 1225–1231. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014).
- [107] Abo-Qudais S A. (2005). Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. *Construction and Building Materials*. 19. P. 257–263. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.07.022](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.022).
- [108] Haddad K. (2018). *Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages*. These de doctorat 3eme cycle LMD. Université de Tizi Ouzou. 149p.
- [109] Haddadou N , Chaid R, Ghernouti Y, Adjou N. Bouzoualegh M. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with different mineral additions and fibers. *J. Build. Mater. Struct.* 2. P. 41-50.
- [110] Ghernouti Y. Rabehi B. Safi B. Chaid R. (2014). Use of recycled plastic bag waste in the concrete. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*. 8. P 480-486. (Online).
- [111] Iqbal Khan M. (2012). Evaluation of non-destructive testing of high strength concrete incorporating supplementary cementitious composites. *Resources, Conservation and Recycling*. 61. P. 125– 129. [doi:10.1016/j.resconrec.2012.01.013](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.013).
- [112] Zidol A, Tohoue Tognonvi M, Tagnit-Hamou A. (2017). Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability. *New Journal of Glass and Ceramics*. 7. P. 34-47. <https://doi.org/10.4236/njgc.2017.72004>.
- [113] Laoufi L. Senhadji Y. Benazzouk A. Langlet T. Mouli M. Laoufi I. Benosman A. S. (2016). Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack" *Journal of Materials and Environmental. Science*. 7. p. 1835-1845.
- [114] Mafalda Matos A. Sousa-Coutinho J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and building materials*. 36. P. 205-215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>.
- [115] Hadjsadok, A. Kenai, S. Courard, L. (2012). Gas and chloride ions permeability of mortar with low hydraulicity slag. *MATEC Web of Conferences* 2. 01011. <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20120201011>

- [116] Bederina, M. Makhloufi, Z. Bounoua, A. Bouziani, T. Queneudec, M. (2013) Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions. *Construction and Building Materials*. 47. P. 146–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037>.
- [117] Ait MedjberF . Saidi M. Safi. B. (2022). Durability of Different UHPFRCs, Made from Pozzolan as a Substitute for Portland Cement and Immersed in Two Aggressive Environments of Hydrochloric and Sulfuric Acids. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*. 17. P. 1 – 9. DOI: <https://doi.org/10.2478/sspjce-2022-0005>.
- [118] Djerfaf N. Nafa, Z. Belaidi, A S E. (2023). Durability of high-performance concrete to an attack by a mixture of sulfuric acid and acetic acid. *Epítőanyag .Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 75. P. 6-16. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.01>.
- [119] Ghrici M. Kenai S. MEZIANE E. (2006). Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Journal of Materials Science*. 41. P. 6965–6972. DOI [10.1007/s10853-006-0227-0](https://doi.org/10.1007/s10853-006-0227-0)
- [120] Bessa A. Bigas J-P. Gallias J-L. (2004). Méthode d'évaluation de l'effet des additions minérales sur le besoin en eau et l'adjuvantation des mortiers. *Revue française de génie civil*. 8. P. 181 à 201. DOI: [10.1080/12795119.2004.9692602](https://doi.org/10.1080/12795119.2004.9692602)

Les Annexes

Notice produit
Edition Janvier 2016
Numéro 211
Version n°2016-009
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.



Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

Présentation	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère polycarboxylate-polyacrylate.
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés. ■ Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants. ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).
Caractères généraux	<p>SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ longue rhéologie (>2h), ■ robustesse à la ségrégation, ■ qualité de parement.
Caractéristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	<p>A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.</p>
Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,060 ± 0,020
pH	5,5 ± 1,0
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	<p>29,5% ± 1,4% (méthode halogène selon NF 085) 29,5% ± 1,4% (NF EN 480-8)</p>

Teneur en ions Cl⁻ ≤ 0,1 %

Conditions d'application

Dosage

Plage de dosage : 0,1 à 5,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Mise en œuvre

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Précautions d'emploi

En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.
Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



SIKA® France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION

11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

Result Analysis Report

Sample Name:
chouaib

SOP Name:

Measured:

dimanche 13 mars 2016 13:01:43

Sample Source & type:

Measured by:
Immc

Analysed:

dimanche 13 mars 2016 13:01:44

Sample bulk lot ref:
13/03/2016

Result Source:
Measurement

Particle Name:
DEFAULT

Accessory Name:
Scirocco 2000 (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1,520

Absorption:
1

Size range:
0,020 to 2000,000 um

Obscuration:
9,30 %

Dispersant Name:
Dry dispersion

Dispersant RI:
1,000

Weighted Residual:
2,673 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0,0047 %Vol

Span :
2,666

Uniformity:
0,836

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0,36 m²/g

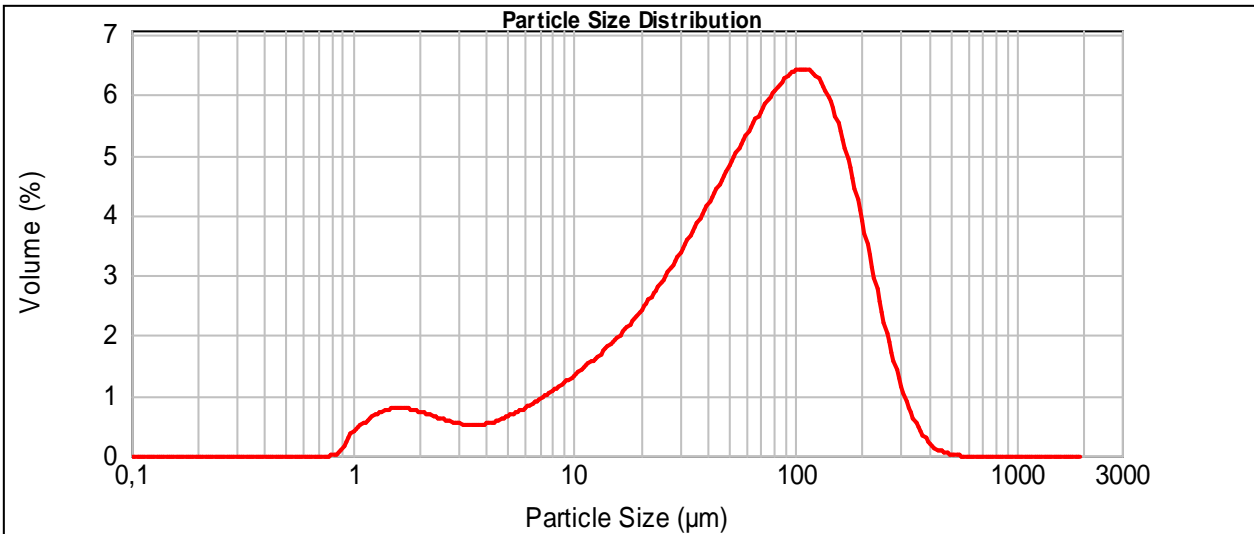
Surface Weighted Mean D[3,2]:
16,675 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
84,322 um

d(0.1): 8,643 um

d(0.5): 66,153 um

d(0.9): 185,018 um



— chouaib, dimanche 13 mars 2016 13:01:43

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0,010	0,00	0,105	0,00	1,096	0,54	11,482	1,44	120,226	5,64	1258,925	0,00
0,011	0,00	0,120	0,00	1,259	0,66	13,183	1,62	138,038	5,23	1445,440	0,00
0,013	0,00	0,138	0,00	1,445	0,71	15,136	1,82	158,489	4,58	1659,587	0,00
0,015	0,00	0,158	0,00	1,660	0,71	17,378	2,04	181,970	3,72	1905,461	0,00
0,017	0,00	0,182	0,00	1,905	0,66	19,953	2,29	208,930	2,80	2187,762	0,00
0,020	0,00	0,209	0,00	2,188	0,59	22,909	2,57	239,883	1,89	2511,886	0,00
0,023	0,00	0,240	0,00	2,512	0,52	26,303	2,87	275,423	1,14	2884,032	0,00
0,026	0,00	0,275	0,00	2,884	0,48	30,200	3,20	316,228	0,58	3311,311	0,00
0,030	0,00	0,316	0,00	3,311	0,46	34,674	3,55	363,078	0,26	3801,894	0,00
0,035	0,00	0,363	0,00	3,802	0,49	39,811	3,91	416,869	0,08	4365,158	0,00
0,040	0,00	0,417	0,00	4,365	0,54	45,709	4,27	478,630	0,02	5011,872	0,00
0,046	0,00	0,479	0,00	5,012	0,63	52,481	4,63	549,541	0,00	5754,399	0,00
0,052	0,00	0,550	0,00	5,754	0,74	60,256	4,98	630,957	0,00	6606,934	0,00
0,060	0,00	0,631	0,00	6,607	0,86	69,183	5,30	724,436	0,00	7585,776	0,00
0,069	0,00	0,724	0,00	7,586	0,99	79,433	5,57	831,764	0,00	8709,636	0,00
0,079	0,00	0,832	0,09	8,710	1,13	91,201	5,75	954,993	0,00	10000,000	0,00
0,091	0,00	0,955	0,39	10,000	1,28	104,713	5,80	1096,478	0,00		
0,105	0,00	1,096		11,482		120,226		1258,925			

Operator notes:

Annexe C. Procédures de malaxage

Protocole de fabrication des mortiers [NF EN 196-1]

Procédure identique pour les deux normes :

- (1) **t<0** : Introduire l'eau dans le malaxeur.
- (2) **t=0** : Vitesse 1, introduire le ciment dans le malaxeur en 30s.
- (3) **t=30s** : Vitesse 1, introduire le sable en 30s.
- (4) **t=1 min** : Vitesse 2 pendant 30s
- (5) **t=1min30** : arrêter le malaxage 1min30 – racler les bords pour remettre la matière à l'intérieur, puis couvrir
- (6) **t=3min** : Vitesse 2, malaxer 1min.
- (7) **t>4min** : Essais à l'état frais ou échantillonnage

Protocole de fabrication des bétons

- (1) **t < 0** : Laver et rincer le malaxeur
- (2) **t < 0** : Introduire le sable dans le malaxeur ; calculer sa teneur en eau, et ajuster la quantité de sable et d'eau en conséquence.
- (3) **T =-2 min 30** : introduire les granulats dans le malaxeur, malaxer 30s.
- (4) **t =-2 min** : introduire la 1ère moitié de l'eau, malaxer 1min
- (5) **t =-1 min** : introduire l'agent entraîneur d'air, malaxer 1min
- (6) **t=0** : introduire le ciment, malaxer 30s (boucher le malaxeur pour éviter toute perte de ciment)
- (7) **t = 30s** : introduire la 2nde moitié de l'eau, contenant un éventuel plastifiant.
- (8) **t = 3 min** : stopper le malaxeur, éventuellement racler les bords
- (9) **t = 5 min** : reprendre le malaxage
- (10) **t = 8 min** : arrêter le malaxage
- (11) **t > 8 min** : Mesures à l'état frais (affaissement, air entraîné, masse volumique et température) puis échantillonnage

Annexe D. Composition chimique et minéralogique du ciment CPJ 42.5

Tableau I. Compositions chimiques du CPJ

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	PAF
Pourcentage (%)	23	5.18	2.9	60.4	1.55	0.7	2.5	2.1

Tableau II. Caractéristiques physiques des ciments

Caractéristiques	CEM I
Consistance normale(%)	26
Début de prise	1h50 min
Fin de prise	4h55 min
Surface spécifique	3244 cm ² /g
Masse volumique	3.12 kg/m ³

Tableau III. Caractéristiques mécaniques des ciments

Résistance (MPa) CPJ	Age (jours)		
	7J	14J	28J
	32	39	43

Annexe E. Composition massique du béton ordinaire BO (avec ciment CPA et E/L=0.5)

	Unité	BOR	BOL1	BOL2	BOL3	BOC1	BOC2
% de PV	%	0	10	20	30	10	20
Ciment C	Kg/m ³	400	360	320	280	360	320
PV	Kg/m ³	0	40	80	120	40	80
Eau	l/m ³	200	200	200	200	180	160
E/L	/	0.5	0.5	0.5	0.5	/	/
E/C	/	0.5	/	/	/	0.5	0.5
Sable	Kg/m ³	624	624	625	624	624	624
G 3/8	Kg/m ³	215	215	215	215	215	215
G 8/15	Kg/m ³	1017	1017	1017	1017	1017	1017
SP	l/m ³	6	6	6	6	5.4	4.8