

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BA DJI MOKHTAR-ANNABA**



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2017

Faculté des sciences de l'ingénierat

Département de Génie Civil

Laboratoire de Matériaux, Géomatériaux et Environnement

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT L.M.D

**COMPORTEMENT PHYSICO MECANIQUE ET DURABILITE DES
BETONS A HAUTES PERFORMANCES A BASE DE DEUX FILLERS
« INFLUENCE DE LA NATURE DES GRANULATS »**

Option

Matériaux innovants et durabilité

Par

Yasmina BISKRI

DEVANT LE JURY

Président	Mourad BEHIM	Pr.	U. BADJI MOKHTAR-ANNABA
Rapporteur	Djamel ACHOURA	Pr.	U. BADJI MOKHTAR-ANNABA
Examineur	Rabah CHAID	Pr.	UMB - BOUMERDES
Examineur	Abdelaziz BENMARCE	Pr.	U. 8 Mai 1945 - GUELMA

Remerciements

Ma gratitude et mes vifs remerciements s'adressent tout d'abord à mon Directeur de thèse, le Professeur Djamel d'avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa totale disponibilité, son soutien constant, son assistance, sa confiance et ces conseils instructifs et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury. Tout d'abord, au Pr. Mourad BEHIM pour avoir accepté de présider mon jury de soutenance, mes remerciements s'adressent également aux Pr. Rabah CHAID, Pr. Abed El-Aziz BENMARECE d'avoir acceptés de rapporter cette thèse.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire Matériaux, Géomatériaux et Environnement (LMGE) de l'université de Annaba sous la direction du Pr. Djamel ACHOURA et au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de INSA de Toulouse sous la direction du Pr. Gilles ESCADEILLAS, dans le cadre de l'accord programme Algéro- Français de partenariat HUBERT CURIEN TASSILI (Code : 12 MDU874), soutenu financièrement par EGIDE. L'accord programme est codirigé par Pr. Mourad BEHIM pour la partie Algérienne et Michel MOURET HDR pour la partie Française.

Je remercie également Mr. Raoul JAUBERTHIE HDR au laboratoire (LGCGM) de l'INSA de Rennes, Michel MOURET et Franck CASSAGNABERE HDR au laboratoire(LMDC) de l'INSA de Toulouse qui nous ont aidés à la réalisation d'une partie expérimentale.

Je remercie également Monsieur Nourredine chelghoume professeur au département du GC et LMGE de l'université d'Annaba pour sa contribution à la traduction de la publication

Je souhaite remercier aussi, le personnel technique des trois laboratoires : département du GC et LMGE de l'université d'Annaba et LMDC de l'UPS/INSA de Toulouse : Vanessa MAZARS et Messieurs Khair-Eddine KHOUALDI, Kamel AKROUM.

Je souhaite ici rendre hommage et exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation ce travail et à son aboutissement.

Je remercie tous mes collègues doctorants que j'ai côtoyés au département Génie Civil de Annaba, pendant ces années de thèse. Un grand merci à mes amis : Imen Sadi, Fatma Zohra Melais, Asma Selami, Houria Meftah, Asma Gemouh, Meriem Boutarfa, Ghania Mirouzi, Amina Houda, Taher Ali boucetta, Oussama Kebail et Adel Keikia avec qui j'ai passé d'agréables moments.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents et à toute ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix d'études et personnels. Un grand merci à ma mère et à mon père, mon mari (houcem) ma petite (Alae el Rahmane), mes frères (abellali, mino, ala, khaled), mes sœurs (ilhem, somaya, moni).

Enfin je renouvelle toute mon amitié et ma sympathie à ceux qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien constant dans ce long travail de recherche.

العنوان: السلوك الفيزيائية و الميكانيكية ومثانة الخرسانة عالية الجودة استنادا الى اثنتين من الإضافات المعدنية "تأثير طبيعية الحصى"

المشرف على الأطروحة بروفيسور جمال عشورة

الخرسانة عالية الجودة هي الخرسانة المبتكرة التي لها مكان في المباني الحديثة حيث ان التقنيات الجديدة لتصميم الخرسانة عالية الجودة تساهم في تحسين الديمومة والحصول على خصائص ميكانيكية جيدة مقارنة بالخرسانة التقليدية من خلال تحسين صفاتها الانسيابية والمسامية المحدودة للغاية. هذه الخصائص تساعد على توسيع استخدامها خصوصا في البيئات العدوانية

الحصى الطبيعية، التي يشيع استخدامها الآن هي مورد غير متجدد الذي يقل بشكل مستمر تقيم المنتجات الصناعية الثانوية المحلية على شكل حصى أو إضافات معدنية في تصنيع مجموعة جديدة من خرسانة عالية الجودة وتحسين خواصها , يؤدي بنا للبحث عن تنسيق بين الأداء والتكلفة، لصناعة مواد قوية مع تعزيز الاستدامة والهدف من هذا العمل هو المساهمة في فهم تأثير طبيعة الحصى الطبيعية أو الاصطناعية حول الخصائص الرئيسية للخرسانة عالية الجودة المبنية على نوعين من الإضافات المعدنية

الجزء الاول من هذا العمل يتعمق في دراسة الخصائص الميكانيكية والمجهرية لخرسانة عالية الجودة متكونة من حصى ذات طبيعة معدنية مختلفة

الجزء الثاني يركز على الاستبدال الكلي لدخان السيليكا بالخبث المحبب الجزائري والطبيعة المعدنية للحصى لتحديد مؤشرات الاستدامة الرئيسية لتقييم مسامية، امتصاص، نفاذيته وتغلغل أيونات الكلوريد النتائج المتحصل عليها تبين وجود علاقة بين الطبيعة المعدنية للحصى الخصائص الفيزيو- ميكانيكية و المجهرية

النتائج اظهرت ايضا ان الاستبدال الكلي لدخان السيليكا بالخبث المحبب الجزائري اعطى نتائج مرضية لقد أبرز تحليل الأداء الميكانيكي المزايا الرئيسية للخرسانة العالية الجودة وهذا ما تؤكد الخصائص الميكانيكية الجيدة والمقاومة الجيدة ضد الاضرار الكيميائي

الكلمات المفتاحية: خرسانة عالية الجودة –الخبث المحبب – السلوك الميكانيكي - الديمومة

RÉSUMÉ

AUTEUR: Yasmina BISKRI

TITRE : COMPORTEMENT PHYSICO MECANIQUE ET DURABILITE DES BETONS A AUTES PERFORMANCES A BASE DE DEUX FILLERS « INFLUENCE DE LA NATURE DES GRANULATS »

DIRECTEUR DE THESE : Pr. Djamel ACHOURA

Le béton à Hautes Performances (BHP) est un béton innovant qui trouve sa place dans les constructions modernes. Les nouvelles techniques de formulation et de conception du béton à hautes performances ont permis d'améliorer la durabilité et d'acquérir des propriétés mécaniques remarquables par rapport aux bétons conventionnels, grâce à l'amélioration de ses qualités rhéologiques et à sa porosité très limitée. Ceci a permis d'élargir son domaine d'emploi en particulier dans les milieux agressifs.

Les granulats naturels, fréquemment utilisés, représentent désormais une ressource non renouvelable dont l'accessibilité diminue de façon continue. La valorisation des sous-produits locaux sous forme de granulats ou additions minérales dans la fabrication d'une nouvelle gamme de bétons à hautes performances avec des propriétés améliorées conduira à rechercher un arrangement entre les performances et le coût dans le but de réaliser un matériau résistant avec une durabilité accrue.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à la compréhension de l'influence de la nature des granulats naturels et/ou artificiels sur les principales caractéristiques des bétons à hautes performances à base de deux types d'additions minérales.

La première partie de la thèse a approfondi les aspects mécaniques et microstructurale des BHP à base de granulats de différentes natures minéralogiques.

La deuxième partie met en évidence les effets de la substitution de la fumée de silice par le laitier granulé et la nature minéralogique des granulats sur les principaux indicateurs de la durabilité par évaluation de la porosité, de l'absorption, de la perméabilité et de la pénétration des ions chlorure.

L'examen des résultats obtenus a permis d'établir les corrélations entre nature minéralogique des granulats et les caractéristiques physico-mécaniques et microstructurales. L'analyse de ces résultats a montré aussi l'intérêt de la substitution totale de la fumée de silice par le laitier granulé algérien dans la formulation des BHP du point de vue performances mécaniques et résistances aux agressions chimiques.

Mots clés : Béton à Hautes Performances, granulats naturels, granulats artificiels, résistance mécanique, durabilité, additions minérales.

ABSTRACT

AUTHOR:

Yasmina BISKRI

TITLE : PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOUR AND DURABILITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE BASED ON TWO MINERAL ADMIXTURES «EFFECT OF THE NATURE OF AGGREGATES»

DIRECTOR OF THESIS:

Pr. Djamel ACHOURA

High Performance Concrete (HPC) is an innovative concrete that has a place in modern buildings. The new formulation techniques and design of high performance concrete have enhanced durability and the acquisition of outstanding mechanical properties over conventional concretes by improving their rheological qualities and their very limited porosity. This has broadened their fields of application especially in aggressive environments.

Natural aggregates, commonly employed, are now a non-renewable resource whose accessibility reduces ongoing basis. The exploitation of by-products as local mineral aggregates or additions in the manufacture of a new range of high performance concretes with improved properties will lead to find an arrangement between performance and cost in order to achieve a resistant material with an increased durability.

The objective of this work is to contribute to the understanding of the effect of natural or artificial source of aggregates on the main characteristics of high performance concretes based on two types of mineral additives.

The first part of this thesis develops the mechanical and microstructural aspects of BHP-based aggregates of different mineral types. The second part highlights the effects of the substitution of the silica fume by granulated slag and the mineralogical nature of the aggregates on key indicators of sustainability by assessing the porosity, absorption, permeability and penetration of chloride ions.

The examining of obtained results allowed establishing correlations between the mineralogical nature of the aggregates and the physical-mechanical properties and microstructure.

Results analysis also showed the interest of full substitution of silica fume by Algerian granulated slag in the formulation of HPC with perspective of mechanical performance and resistance to chemical attack.

Keywords: High Performance Concrete, Ground Granulated Blast Furnace Slag, silica fume, microstructure, nature of aggregate, mechanical properties, durability.

SOMMAIRE

Remerciements.....	i
ملخص	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
Sommaire.....	v
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
Introduction générale.....	2
Chapitre I: Etude bibliographique.....	6
I.1. Introduction.....	7
I.2. Généralités sur les bétons à hautes performances.....	7
I.2.1. Définition.....	7
I.2.2. Performance des BHP.....	8
I.3. Les voies d'obtention des hautes performances.....	9
I.3.1. Principes des BHP.....	9
I.3.2. Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté.....	10
I.3.2.1. Porosité.....	11
I.3.2.2. Diminution de la taille des grains des produits d'hydratation.....	13
I.4. Compositions des BHP.....	13
I.4.1. Le ciment.....	13
I.4.2. Les granulats.....	14
I.4.2.1. Granulats naturels.....	15
I.4.2.2. Granulats artificiels.....	17
I.4.2.2.1. Scorie.....	17
I.4.2.2.2. Laitier cristallisé.....	18
I.4.3. Additions minérales.....	18
I.4.3.1. Effet des additions minérales.....	19
I.4.3.2. Différent types d'additions.....	20
I.4.3.2.1. La fumée de silice.....	20
I.4.3.2.2. Laitier de haut fourneau.....	22
I.4.4. Superplastifiant.....	23

SOMMAIRE

I.5. Microstructure des BHP.....	24
I.6. Méthode de formulation.....	30
I.6.1. La méthode de L'université de Sherbrooke.....	30
I.7. Performance mécanique des BHP.....	33
I.7.1. Résistance mécanique.....	33
I.8. Propriétés physico-chimiques et durabilité.....	34
I.8.1. Porosité.....	34
I.8.2. Absorption d'eau.....	36
I.8.3. Perméabilité au gaz.....	36
I.8.4. Diffusion des ions chlorure.....	38
I.9. Conclusion générale.....	38
Chapitre II: Matériaux et formulation des bétons.....	40
II.1. Introduction.....	41
II.2. Matériaux utilisés.....	41
II.2.1. Ciment.....	41
II.2.2. Additions minérales.....	43
II.2.2.1. Laitier granulé.....	43
II.2.2.2. Fumée de silice.....	44
II.2.3. Granulats.....	46
II.2.3.1. Identification des granulats.....	47
II.2.3.2. Propriétés chimiques et minéralogiques.....	51
II.2.3.3. Evaluation de l'expansion des granulats de scorie.....	55
II.2.4. Superplastifiant.....	56
II.2.5. Eau.....	57
II.3. Formulation des bétons d'étude.....	57
II.3.1. Optimisation du squelette granulaire par méthode de Dreux-Gorisse.....	58
II.3.2. Formulation des BHP par la méthode de l'université de Sherbrooke.....	58
II.4. Confection et conservation des éprouvettes.....	60
II.5. Procédures de la détermination des propriétés du béton à l'état frais.....	60
II.5.1. Masse volumique à l'état frais.....	60
II.5.2. Affaissement au cone d'abrams.....	62

SOMMAIRE

II.5.3. Mesure de la teneur en air occlus.....	63
II.6. Conclusion.....	65
Chapitre III: Comportement physico-mécanique des BHP.....	67
III.1. Introduction.....	68
III.2. Essais physico-mécaniques.....	68
III.2.1. Masse Volumique à l'état durci.....	68
III.2.2. Essai de compression.....	68
III.2.3. Essais de traction par flexion.....	69
III.3. Résultats et discussion.....	70
III.3.1. Masse Volumique à l'état durci.....	70
III.3.2. Résistance en compression.....	72
III.3.2.1. Effet de la nature des granulats.....	74
III.3.2.2. Effet des additions minérales.....	77
III.3.3. Résistance en traction par flexion.....	79
III.3.3.1. Effet des granulats et additions minérales.....	81
III.4. Analyse macro et microstructural.....	84
III.5. Conclusion.....	87
Chapitre IV: Durabilité des BHP.....	89
IV.1. Introduction.....	90
IV.2. Protocol Experimental.....	91
IV.2.1. Porosité accessible à l'eau.....	91
IV.2.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	92
IV.2.2.1. Préparation des échantillons.....	92
IV.2.2.2. Détermination de l'absorption d'eau par capillarité.....	93
IV.2.3. Perméabilité à l'oxygène.....	94
IV.2.4. Diffusion des ions chlorure.....	96
IV.2.4.1. Préparation des échantillons.....	97
IV.2.4.2. Détermination du coefficient de diffusion des ions chlorure.....	98
IV.3. Résultats et interprétation.....	99
IV.3.1. Porosité accessible à l'eau.....	99
IV.3.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	102

SOMMAIRE

IV.3.3. Perméabilité à l'oxygène.....	103
IV.3.4. Diffusion des ions chlorure.....	106
IV.4. Analyse Thermogravimétrique (ATG).....	108
IV.4.1. Introduction.....	108
IV.4.2. Procédure expérimentale.....	109
IV.4.3. Manière d'exploitation des résultats de l'ATG et de la DTG.....	110
IV.4.4. Résultats et interprétation.....	112
IV.5. Conclusion.....	119
Conclusion générale.....	122
Référence bibliographique.....	128
Annexes.....	140

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Répulsion électrostatique et stérique entre des particules de ciment.....	23
Figure I.2. Cristaux de Portlandite.....	26
Figure I.3. Gel de CSH.....	26
Figure I.4. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un Béton Ordinaire.....	28
Figure I.5. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat.....	29
Figure I.6. Abaque de détermination du rapport E/L.....	31
Figure I.7. Détermination du dosage en eau.....	31
Figure I.8. Dosage en gros granulat.....	32
Figure I.9. Représentation schématique d'un béton poreux.....	37
Figure II.1. Illustration de l'effet filler.....	43
Figure II.2. Laitier granulé.....	44
Figure II.3. Diffractogramme du laitier granulé.....	44
Figure II.4. Fumée de silice.....	46
Figure II.5. Diffractogramme de la fumée de silice.....	46
Figure II.6. Morphologie des granulats d'études.....	47
Figure II.7. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de calcaire pur blanc..	49
Figure II.8. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de calcaire cristallin gris.....	49
Figure II.9. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de calcaire marneux noire	50
Figure II.10. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de laitier cristallisé...	50
Figure II.11. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de scorie.....	50
Figure II.12. Diagramme de diffraction X du calcaire pur.....	53
Figure II.13. Diagramme de diffraction X du calcaire cristallin.....	53
Figure II.14. Diagramme de diffraction X du calcaire marneux.....	53
Figure II.15. Diagramme de diffraction X du laitier cristallisé.....	54
Figure II.16. MEB-EDS de la scorie.....	54
Figure II.17. Moule de compactage pour l'essai de l'autoclave.....	55
Figure II.18. Organigramme de formulation des BHP.....	58
Figure II.19. La masse volumique des différents BHP	61

LISTE DES FIGURES

Figure II.20. Variation de l'affaissement des BHP	63
Figure II.21. Mesure de la teneur en air occlus	64
Figure II.22. Variation de l'air occlus des différents BHP.....	65
Figure III.1. Description d'essai de compression.....	69
Figure III.2. Description d'essai de traction par flexion.....	70
Figure III.3. La masse volumique des différents types des BHP à l'état durcis avec filler de laitier.....	70
Figure III.4. La masse volumique des différents types des BHP à l'état durcis avec fumée de silice.....	71
Figure III.5. La masse volumique des différents types des BHP (effet des additions minérales).....	71
Figure III.6. Résistance en compression des BHP avec fumée de silice (effet de la nature des granulats naturels).....	74
Figure III.7. Résistance en compression des BHP avec filler de laitier granulé (effet de la nature des granulats naturels).	75
Figure III.8. Résistance en compression des BHP avec fumée de silice (effet de la nature des granulats artificiels et naturels).....	76
Figure III.9. Résistance en compression des BHP avec filler de laitier granulé (effet de la nature des granulats artificiels et naturels).....	76
Figure III.10. Effet des additions minérales sur la résistance en compression des BHP.....	77
Figure III.11. Courbe Charge - Déplacement des BHP avec fumée de silice (Effet de la nature des granulats naturels).....	81
Figure III.12. Courbe Charge - Déplacement pour les BHP avec laitier granulé (Effet de la nature des granulats naturels).	81
Figure III.13. Courbe Charge - Déplacement pour les BHP avec fumée de silice (Effet de la nature des granulats artificiels et naturels).....	82
Figure III.14. Courbe Charge - Déplacement pour les BHP contenant du laitier granulé (Effet de la nature des granulats artificiels et naturels).....	83
Figure III.15. Résistance en traction par flexion à 28 jours des BHP	83
Figure III.16. Analyse macrostructural des BHP à base de granulats de laitier cristallisé....	84
Figure III.17. Analyse macro structural des BHP à base de granulats de scorie.....	84

LISTE DES FIGURES

Figure III.18. Analyse macro structural des BHP à base de granulats de calcaire pur blanc.	85
Figure III.19. Photos de MEB pour BHP avec granulats de calcaire cristallin.....	85
Figure III.20. Photos de MEB pour BHP avec granulats de calcaire pur blanc.....	86
Figure III.21. photos de MEB pour BHP avec granulats de calcaire marneux.....	86
Figure IV.1. Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau..	92
Figure IV.2. Schéma du dispositif de la mesure de l'absorption d'eau par capillarité.....	93
Figure IV.3. Principe de dispositif du perméamètre CEMBUREAU.....	95
Figure IV.4. Intérieur d'une cellule de perméabilité (LMDC- INSA Toulouse).....	95
Figure IV.5. Perméabilité en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'essai.....	96
Figure IV.6. Schéma de la cellule de migration.....	97
Figure IV.7. Essai de migration des ions chlorure (LMDC- INSA Toulouse).....	98
Figure IV.8. Méthode de mesure de la profondeur de pénétration des chlorures.....	98
Figure IV.9. Influence des granulats et des additions minérales sur la porosité accessible...	100
Figure IV.10. Microstructure de la matrice cimentaire des BHP.....	101
Figure IV.11. Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour les BHP avec FL.....	102
Figure IV.12. Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour les BHP avec FS.....	103
Figure IV.13. Perméabilité à l'air pour BHP avec FL.....	104
Figure IV.14. Perméabilité à l'air pour BHP avec FS.....	104
Figure IV.15. Essai de la migration des ions de chlore.....	108
Figure IV.16. Dispositif utilisé pour l'analyse thermogravimétrique.....	109
Figure IV.17. Courbes issues d'une analyse thermique et exploitations associées.....	110
Figure IV.18. Détermination de la quantité de la portlandite par la méthode de tangente....	111
Figure IV.19. Analyse d'une courbe DTG en utilisant la méthode de la déconvolution.....	112
Figure IV.20. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de calcaire pure et filler du laitier granulé.....	113
Figure IV.21. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de laitier cristallisé et filler du laitier granulé.....	113
Figure IV.22. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de scorie et filler du laitier granulé.....	114

LISTE DES FIGURES

Figure IV.23. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de calcaire pure et fumée de silice.....	114
Figure IV.24. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de laitier cristallisé et fumée de silice.....	115
Figure IV.25. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de scorie et fumée de silice.....	115
Figure IV.26. Déconvolution des profils de DTG pour la détermination des quantités des C-S-H pour BHP avec calcaire pure et filler de laitier granulé et fumée de silice.....	118
Figure IV.27. Déconvolution des profils de DTG pour la détermination des quantités des C-S-H pour BHP avec laitier cristallisé et filler de laitier granulé et fumée de silice.....	118
Figure IV.28. Déconvolution des profils de DTG pour la détermination des quantités des C-S-H pour BHP avec scorie et filler de laitier granulé et fumée de silice.....	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Composition chimique du ciment CPJ- CEM II/A 42.5.....	42
Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment CPJ- CEM II/A 42.5.....	42
Tableau II.3. Propriétés physiques du ciment CPJ- CEM II/A 42.5.....	42
Tableau II.4. Résistance mécaniques du ciment CPJ- CEM II/A 42.5.....	42
Tableau II.5. Composition chimique du laitier granulé.....	44
Tableau II.6. Caractéristiques physiques du laitier granulé.....	44
Tableau II.7. Composition chimique de la fumée de silice.....	45
Tableau II.8. Caractéristiques physiques de la fumée de silice.....	45
Tableau II.9. Dénomination des granulats utilisés.....	46
Tableau II.10. Propriétés physiques et mécanique des granulats.....	48
Tableau II.11. Composition chimique des granulats.....	51
Tableau II.12. Résultat du teste de l'expansion des granulats de scorie.....	56
Tableau II.13. Caractéristiques technique de superplastifiant.....	57
Tableau II.14. Formulation des différents BHP.....	59
Tableau II.15. Masses volumiques à l'état frais des BHP	61
Tableau II.16. Valeur de l'affaissement au cône d'Abrams des BHP d'étude	62
Tableau II.17. Mesure de l'air occlus des BHP.....	64
Tableau III.1. Résistance en compression des BHP avec fumée de silice.....	72
Tableau III.2. Résistance en compression des BHP avec filler de laitier granulé.....	73
Tableau III.3. Résistance en traction par flexion à 28 jours des BHP avec fumée de silice.....	79
Tableau III.4. Résistance en traction par flexion à 28 jours des BHP avec filler de laitier granulé.....	80
Tableau IV.1. Classification des résistances des bétons face à la pénétration des chlorures...	99
Tableau IV.2. Porosité accessible à l'eau des BHP	100
Tableau IV.3. Le coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des BHP avec filler de laitier granulé.....	105
Tableau IV.4. Le coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des BHP avec fumée de silice.....	106
Tableau IV.5. Coefficient de migration non-stationnaire des BHP étudiés.....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.6. Intervalles de températures associés à la décomposition de phases.....	111
Tableau IV.7. Teneur en Portlandite selon la méthode de tangente.....	117
Tableau IV.8. Quantité des C-S-H contenus dans les différents échantillons à l'âge de 60 jours.....	119

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Algérie est un pays en voie de développement, qui adapte un programme de développement durable dans tous les domaines, surtout dans le domaine de l'industrie de construction. Dans ce contexte la fabrication des bétons durables est devenue une nécessité du premier ordre. Les BHP sont parmi ces bétons qui assurent conjointement une résistance mécanique très élevée et une durabilité accrues. Ces deux qualités sont obtenues grâce au développement récent en technologie de fabrication des ciments, des ajouts minéraux actifs (fumée de silice, laitier granulé, pouzzolane,etc.) et de super plastifiants hautement réducteurs d'eau.

L'utilisation des bétons à hautes performances « BHP » est actuellement en pleine expansion dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages. Les principaux avantages des BHP sont liés à leur faible porosité, leur résistance mécanique très élevée ($f_c > 60$ MPa) et leur durabilité accrue. La facilité de mise en place qui est obtenus par l'emploi conjugué de superplastifiant et des additions minérales. Ceci permet d'augmenter la résistance à la compression tout en améliorant l'ouvrabilité et la durabilité.

Dans les formulations des BHP les granulats, par leur forte proportion massique et volumique, jouent un rôle important dans le comportement macroscopique. Leur utilisation est motivée par une meilleure durabilité et une stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau. Lors de la sélection des granulats il est nécessaire de bien connaître leurs propriétés intrinsèques : résistance mécanique, minéralogie, morphologie, granulométrie appropriée et module d'élasticité. Ces propriétés influencent les performances du béton en particulier la qualité de l'adhérence granulat-matrice cimentaire.

Les roches naturelles sont la source principale de granulats pour bétons. L'utilisation des granulats artificiels reste relativement limitée ou même abandonnée. Cependant leur utilisation est très motivée en termes environnementale et performances mécaniques. Ceci offre une nouvelle approche de valorisation des sous- produits artificiels qui répond aux exigences de conservation des ressources naturelles et de préservation de l'environnement.

Durant ces dernières décennies, plusieurs travaux de recherche ont été élaborés dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton à l'état frais et durci. Des études et

INTRODUCTION GÉNÉRALE

des découvertes n'ont pas cessées de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance. Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle que les adjuvants et les additions minérales fines. L'utilisation des sous-produits sidérurgique en tant qu'ajouts cimentaires ou sous forme de granulats dans le mélange du béton est très bénéfique du point de vue économique et écologique. L'usine sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba, Algérie) présente une bonne source de sous-produits sous forme de granulats de laitier cristallisé et de scorie ou sous forme d'ajout cimentaire de laitier granulé broyé.

Le laitier granulé d'El-Hadjar (Annaba, Algérie) est utilisé par la cimenterie de Hdjar-Soud pour la production du CEM II 42,5 mais avec un faible taux de laitier qui est de l'ordre de 15% en moyenne à cause de son faible pouvoir hydraulique. A l'heure actuelle, l'utilisation des laitiers dans les BHP est relativement limitée, Jusqu'à présent les laitiers ont été utilisés en parallèle avec la fumée de silice pour fabriquer des BHP de classe I, II et III. En Algérie la production annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes/an. L'utilisation des laitiers de hauts fourneaux dans la fabrication des BHP constitue une nouvelle avancée pour une construction durable et offre des avantages d'ordre économique, technique et écologique. Le laitier granulé présente non seulement un intérêt du point de vue des performances, mais aussi un intérêt économique par le prix compétitif et un intérêt écologique par une limitation des émissions de CO₂ associées à la fabrication du ciment et par réduction des stocks sur site. L'incorporation de la fumée de silice et filler de laitier dans les formulations des BHP a largement été étudiée par plusieurs auteurs.

Devant les besoins croissants en granulats naturels et suite aux exigences environnementales, l'utilisation des granulats artificiels de laitier cristallisé et de scorie dans les bétons et les bétons à hautes performances présente plusieurs avantages technico-économiques et écologiques, car ces granulats sont utilisés uniquement sous forme d'agrégats dans la construction des routes et leur future utilisation dans le béton pourrait être intéressante.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la valorisation des sous-produits sidérurgiques sous forme d'addition minérale et sous forme de granulats dans l'élaboration et l'amélioration des bétons à hautes performances.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Notre étude a deux objectifs, le premier concerne l'effet des granulats naturels et artificiels sur le comportement physico-mécanique et la durabilité des BHP à base de filler de laitier granulé de haut fourneau d'El- Hadjar en remplacement total de la fumée de silice. Le deuxième objectif est la valorisation des granulats artificiels (laitier cristallisé et scorie) afin de fabriquer une nouvelle gamme de BHP qui répond aux exigences de résistance et de durabilité.

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces préoccupations, une campagne expérimentale concernant l'évolution de propriétés mécaniques et physiques du matériau dans le temps a été élaborée et présentée dans ce manuscrit qui comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à l'étude bibliographique dans lequel il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail. Ce chapitre aborde les différents aspects des bétons à hautes performances notamment des généralités qui concernent leurs émergences, ainsi que les différentes méthodes de formulations. On exposera aussi les rôles joués par les différents types des granulats et les différents types d'additions minérales ensuite on expose les différents mécanismes de transfères (durabilité).

La première partie du deuxième chapitre décrit en détail la caractérisation minéralogique, physique et mécanique tous les matériaux utilisés. La deuxième partie du chapitre est une description des différentes méthodes formulations et les protocoles expérimentaux pour fabriquer les BHP. Cette partie se termine par une présentation des résultats d'essais expérimentaux de l'influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés des BHP à l'état frais.

Le troisième chapitre traite les propriétés des BHP à l'état durci dans laquelle on a mis en évidence l'effet de la nature des granulats et des additions minérales sur les résistances mécaniques en compression et en traction par flexion des BHP. À partir des résultats obtenus à travers cette étude, plusieurs enseignements sont avancés.

Le quatrième présente les résultats d'essais liés à la caractérisation de la durabilité des différents types des BHP. Ces essais ont tout d'abord été réalisés pour estimer les propriétés de transfert significatives mises en jeu dans les échanges potentiels du matériau BHP avec son

INTRODUCTION GÉNÉRALE

environnement et concerne les tests de porosité, de perméabilité à l'oxygène et de diffusion des ions chlores.

Le manuscrit s'achève par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus sur la comparaison entre les différents types de BHP formulés du point de vue mécanique et physico-chimique et mis en évidence la valorisation des granulats artificiels dans la fabrication des nouvelles gammes des bétons. Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouveaux éclaircissements pertinents à ces nouveaux matériaux du génie civil.

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Les bétons à hautes performances (BHP) ou High Performance Concrete (HPC) en anglais ont été utilisés depuis les années 1980 afin d'améliorer la capacité portantes et la durabilité des structures de construction. Ces bétons se développent actuellement dans tout le monde et semblent être amenés à remplacer les bétons classiques dans de nombreuses applications. Plusieurs questions sont posées par les utilisateurs du BHP en particulier par les maîtres d'ouvrage qui nécessitent des réponses claires :

- Quelles sont les conséquences d'utilisation d'autres additions minérales en remplacement ou en accumulation à la fumée de silices.
- la possibilité d'utilisation des granulats artificiels ou de recyclage dans les BHP et leurs effets sur les performances mécaniques et la durabilité.

L'objectif de notre travail a été, autant que possible, de donner une réponse claire à ces interrogations et de contribuer ainsi au développement de ce nouveau béton.

Pour cela, le premier chapitre a consisté à réunir le maximum de documents publiés sur ce sujet pour apporter les premiers éléments de réponse à notre problème.

Ce chapitre commence par un aperçu général sur les différents aspects du béton à hautes performances. Ensuite une description des différents types de granulats et d'additions minérales et leurs effets sur le comportement physico-mécanique des BHP seront développés.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre nous aborderons des études menées sur la durabilité tout en mettant en évidence l'effet des granulats et des additions minérales sur les différents mécanismes de transfert dans les BHP. La synthèse de l'étude bibliographique nous permettra de donner une idée sur les travaux effectués et les résultats obtenus et de proposer une méthodologie pour notre étude.

I.2. Généralités sur les bétons à hautes performances

I.2.1. Définition

Les bétons à hautes performances (BHP), sont des bétons durables dont la diminution de la porosité rendue possible par le choix d'un étendu de mélange granulaire plus compacte, par l'addition d'éléments ultrafins et par l'ajout de superplastifiant hautement réducteur d'eau nécessaire pour l'obtention d'une maniabilité suffisante [Zaina 2000]. Ces bétons présentent une

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

meilleure perméabilité et une bonne protection chimique aux agents agressifs [Vejmelkov 2009], [Aitcin 2001]. A l'heure actuelle, plusieurs pays développent l'utilisation des BHP. Plus particulièrement la Norvège qui utilise le BHP dans la construction des structures Offshore. Les Etats-Unis et le Canada sont intéressés par l'utilisation des BHP dans la construction mixtes et les gratte-ciels. La France oriente ses efforts au développement des BHP pour les ouvrages d'art [Kaikea 2015]. En plus de ces principaux domaines, on peut citer quelques applications plus particulières, comme les éléments préfabriqués pour le bâtiment, les chaussées, les assainissements, les tunnels et encore les centrales nucléaires [Tahenni 2006].

I.2.2. Performances des BHP

Les BHP présentent des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel:

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (porosité et perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution des risque de l'alcali-réaction, meilleure résistance au gel,...etc.). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme.
- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.
- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et par conséquent, la diminution du poids de la construction.
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés.
- Un retrait total réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi ce qui concerne les pertes de précontrainte.

I.3. Les voies d'obtention des hautes performances

Les études ont montrées les effets néfastes pour la résistance et la durabilité d'un excès d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité et la mise en œuvre. Il était donc nécessaire de chercher

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

à diminuer raisonnablement ce dosage en eau en introduisant des fluidifiants. En parallèle les chercheurs voulaient un béton compacte on incorporant des ultrafines. Ainsi deux voies se constituèrent pour obtenir les hautes performances [Chafi 2005]:

A- Défloculation des grains de ciment

Obtenue grâce à l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélanine sulfonate). Elle permet aux grains en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle donc à une réduction sensible de l'eau qui n'est plus bloquée dans les flots de grains.

B- Extension de l'étendu granulaire

Obtenue en introduisant des éléments ultrafins (fumée de silice, fillers de laitier granulé) chimiquement réactifs, qui remplissent les vides pour augmenter la compacité et la rhéologie du béton. Du point de vue applicabilité avec des matériaux locaux, on peut obtenir des bétons ayant une résistance atteignant à la compression entre 60 et 80 MPa. Avec d'autres approches plus strictes et avec un bon choix des constituants on peut atteindre des performances dépassant 90 MPa.

I.3.1. Principes des BHP

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt les fruits d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique. Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails. En fait, tant et aussi longtemps que les BHP seront fabriqués avec des matériaux aussi simples et peu coûteux que ceux que l'on utilise pour faire des bétons usuels, il n'est pas évident qu'une recette magique simple puisse donner directement la composition optimale d'un BHP donné. Il faudra donc toujours, en un endroit donné, rechercher la meilleure combinaison de matériaux locaux pour obtenir un BHP ayant un rapport eau/ciment désiré.

Comme on le verra, fabriquer un BHP est une opération un peu plus compliquée que de produire un béton usuel. Les raisons en sont simples : au fur et à mesure que la résistance à la compression visée augmente, les propriétés du béton ne sont plus simplement reliées au rapport eau/liant, le paramètre fondamental qui gouverne les propriétés des bétons usuels par l'intermédiaire de la porosité de la pâte de ciment hydraté [Aitcin 2001].

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.3.2. Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté

Les C-S-H sont des poly-minéraux non cristallins (amorphes). Selon Aitcin les C-S-H peut, en première approximation, être considérée comme un matériau monocristallin auquel on peut appliquer les principes gouvernant le comportement des solides fragiles tels que les céramiques. Cela est particulièrement vrai dans le cas des BHP qui présentent beaucoup plus de similarités microstructurales avec les céramiques que les bétons usuels très poreux.

La dépendance de la résistance à la traction d'un matériau monophasique cristallin par rapport à sa porosité s'exprime généralement par la relation exponentielle de type :

$$S = S_0 e^{-bp} \quad (\text{Eq. I.1})$$

Où :

S : la résistance à la traction du matériau qui a une certaine porosité,

S₀ et p : la résistance à la traction intrinsèque du matériau lorsque la porosité est nulle,

b : paramètre qui dépend de la taille et de la forme des pores.

La résistance à la compression d'un matériau fragile est plus grande que sa résistance à la traction parce que, en traction, un matériau se rompt par la propagation rapide d'une simple fissure alors qu'il faut qu'un certain nombre de fissures de traction se réunissent pour causer une rupture en compression. Il n'y a pas encore eu d'approche spécifique pour dériver la résistance à la compression d'un matériau poreux à partir de la connaissance des caractéristiques de sa microstructure. Cependant, d'un point de vue empirique, beaucoup d'études ont démontré que la résistance à la compression obéissait à une loi du type :

$$f'_c = f_c (1-p)^m \quad (\text{Eq. I.2})$$

f'_c : c'est la résistance à la compression du matériau contenant une porosité,

f_c et p : représente la résistance à la compression intrinsèque d'un matériau donné lorsqu'il a une porosité nulle,

m : est un paramètre qui dépend de la nature des liens inter cristallins que l'on trouve dans le solide.

La résistance d'une pâte de ciment hydraté peut être améliorée en considérant de façon plus détaillée les paramètres suivants :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- ❖ **Porosité** : un grand nombre de gros pores ou de vides de diamètre supérieur à 50 nm, concentrés en un endroit donné peuvent diminuer considérablement la résistance d'un matériau,
- ❖ **La taille des granulats** : en général, la résistance d'une phase cristalline augmente lorsque la taille des grains diminue,
- ❖ **Hétérogénéité**: avec des matériaux multiphasiques, les hétérogénéités microstructurales sont une source de perte de résistance.

I.3.2.1. Porosité

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, si bien l'hydratation des portions non encore hydratées des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion.

Comme les premiers produits d'hydratation cristallisent à l'extérieur dans l'espace remplis d'eau qui entoure les grains de ciment (c'est-à-dire à l'extérieur des limites d'une particule de ciment qui s'hydrate), on les appelle des produits d'hydratation externe. Par contre, lorsque les produits de l'hydratation se forment par des réactions à l'intérieur des limites des particules de ciment, on les appelle des produits d'hydratation interne, ils sont plus compacts et moins bien cristallisés que les produits d'hydratation externes.

Du point de vue de la résistance, il est donc très important d'obtenir une microstructure qui rassemble des produits internes plutôt qu'à celle des produits externes.

Comme on le verra plus tard, le concept de produits d'hydratation interne et externe d'un ciment est utile pour apprécier le rôle des faibles rapports eau/ciment, des superplastifiants et des matériaux cimentaires que l'on utilise pour fabriquer des BHP. Les principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment hydraté sont le rapport de l'eau disponible au volume de la phase de silicates qui peut s'hydrater et la quantité d'air piégé durant le malaxage. En 1892, Féret a exprimé ce principe sous forme d'une loi :

$$f'c = k\left(\frac{c}{c+a+e}\right)^2 \quad (\text{Eq. I.3})$$

Où :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

f^c : représente la résistance à la compression de la pâte de ciment hydraté,

c, e, a : les volumes du ciment, de l'eau et d'air respectivement,

K : est une constante qui dépend du type de ciment (Féret, 1892).

Comme Féret a certainement établi cette formule en n'utilisant que du ciment portland pur, la lettre c représente le volume de ciment portland.

En divisant par c le numérateur et le dénominateur, l'expression de Féret peut être réécrite de la façon suivante :

$$f^c = K \frac{1}{(1 + \frac{e}{c} + \frac{a}{c})^2} \quad \text{(Eq. I.4)}$$

Dans une pâte de ciment hydraté ou dans un béton, le volume d'air piégé est généralement inférieur à 1 ou 2% du volume total du béton, on peut donc négliger le terme a/c dans l'équation I.4. Ainsi, l'expression de Féret peut s'écrire :

$$f^c = K \frac{1}{(1 + \frac{e}{c})^2} \quad \text{(Eq. I.5)}$$

Si l'on désire augmenter la résistance à la compression d'un béton, il devient évident qu'il faut absolument réduire le rapport eau/ciment. Quand le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydraté est réduit, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres dans mélange fraîchement malaxé [Aitcin 2001].

I.3.2.2. Diminution de la taille des grains des produits d'hydratation

La diminution du rapport eau/liant favorise la formation de produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine, les C-S-H dans ces produits d'hydratation internes ressemblent beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe.

I.4. Compositions des BHP

Le béton est un matériau multiphasique contenant trois phases: solide (granulats et pâte cimentaire), liquide (eau libre et adsorbée) et gazeuse (air et vapeur d'eau). Ses propriétés mécaniques se développent grâce à l'hydratation du ciment. La complexité de sa microstructure est une des causes de son comportement mécanique particulier lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques...).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour confectionner un BHP performant il faut améliorer les performances de la matrice cimentaire, les granulats et la zone de transition (ITZ) [Maso 1980].

L'utilisation de superplastifiant et des additions minérales dans la composition des BHP permet de réduire sa porosité. En plus la nature minéralogique des granulats, la dimension maximale des gros granulats et l'optimisation de la distribution du squelette granulaire sont nécessaire dans le choix du granulat.

I.4.1. Le ciment

Le premier choix sur lequel il faut s'attarder lorsqu'on veut fabriquer un BHP est celui du ciment, tout en assurant une bonne maniabilité et une finition de qualité. Les performances des ciments commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seuls quelques-uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques. Il existe bien évidemment, comme nous le verrons par la suite, des solutions qui permettent de pallier aux manques de performances des ciments commerciaux, (utilisation de superplastifiants réducteurs d'eau, additions minérales, etc.). Les principales Caractéristiques d'un ciment sont rappelées ci-dessous:

- **La finesse du ciment** : la recherche de la finesse optimale est une des exigences pour réaliser un BHP. L'augmentation de cette finesse conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneur en fine. Au contact de l'eau, il se forme alors très rapidement plus de C-S-H à la surface des grains de ciments, ce qui nuira au maintien de la rhéologie initiale. Enfin, plus le ciment est très fin, plus les risques de fissuration dus au retrait seront grands. En règle générale, il est recommandé à limiter la taille inférieure des grains de ciment à $1\mu\text{m}$ [Azi2006].
- **La teneur en C_3S** : les ciments à teneur élevée en C_3S présentent un intérêt pour la fabrication de BHP de forte résistance au jeune âge. En effet, le C_3S présente une meilleure réactivité par rapport au C_2S , ce dernier agissant plutôt sur les résistances à moyen et long terme.
- **Composition de la phase interstitielle**: elle régit la durabilité du béton en termes d'attaques chimiques. D'une façon générale, les ciments présentant un pH de la solution interstitielle faible sont plus résistants aux altérations chimiques (attaques acides en particulier). Ceci en raison de la meilleure stabilité chimique des phases solides qu'ils contiennent et de la diminution des gradients ioniques avec le milieu agressif qui en découlent. Un béton

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

contenant peu de portlandite sera en particulier plus stable qu'un béton qui en contiendrait beaucoup [Camps 2008].

- **La teneur et morphologie du C_3A :** pour la formulation des BHP, l'utilisation d'un ciment contenant une faible teneur en C_3A permet de faciliter le contrôle de la rhéologie. Du point de vue de la résistance, ce ciment n'a pas à être broyé finement et à contenir une quantité de C_3S pour garantir une bonne rhéologie. Les ciments de type II et V sont satisfaisants en termes de C_3A , mais en générale, ils ne sont pas broyés assez finement et leur teneur en C_3S est faible, de façon à limiter la quantité de chaleur d'hydratation. En outre, la limitation de la teneur en C_3A améliore la durabilité du béton en permettant une meilleure résistance aux milieux agressifs, en particulier aux attaques sulfatiques externes en raison de la limitation du risque de formation d'ettringite secondaire.

I.4.2. Les granulats

Les granulats occupent une grande partie du volume du béton (60 à 75%) sont la source de sa résistance mécanique [Dreux 2002]. Les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus possible de vides dans le béton. C'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs classes granulaires dans un même béton.

Les granulats utilisés pour la confection du béton peuvent être naturels (origine minérale sans transformation autre que mécanique, Ils proviennent essentiellement de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzites, ou de roches magmatiques telles que les basaltes, les granites ou les porphyres. Indépendamment de leur nature, les granulats peuvent être alluvionnaires (dits granulats roulés) ou de carrière (dits granulats concassés), artificiels (origine minérale et transformés) ou recyclés.

I.4.2.1. Granulats naturels

La résistance des granulats naturels dépend de la roche mère qui a été concassée ou réduite à la dimension actuelle après avoir subi différents processus naturels ou mécanique. Les roches mères que l'on utilise pour fabriquer des granulats naturels peuvent être des roches monophasiques telles les calcaires, les calcaires dolomitiquesetc.

Les granulats doivent avoir les caractéristiques adéquates permettant :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- de résister aux contraintes transmises par la pâte de ciment,
- d'optimiser la densité du squelette granulaire final pour un béton compact,
- d'obtenir une zone de transition pâte-granulats de bonne qualité.

Pour cela, plusieurs paramètres entrent en jeu dans le choix des granulats : la minéralogie, la morphologie et la granulométrie.

- **La nature minéralogique** : son incidence sur la qualité de l'ITZ (Interfacial Transition Zone) et sur les risques de développement de l'alcali-réaction semble avérée mais aussi sur les déformations différées du béton [Neville 1996]. L'effet de la nature minéralogique des granulats sur les propriétés des bétons a été étudié par [Farran 1956], [Maso 1969], [Alexander 1989], [Baalbaki 1991], [Giaccio 1992] et [Neville 1996]. Les auteurs montrent que les bétons avec granulats de calcaire (85% calcite) donnent les meilleures performances par rapport à celles avec granulats de dolomite et quartz. Pour cette raison ils sont conclus que les granulats calcaires (réactifs) offrent en particulier une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment [Beshr 2003], [Ergu 2004]. Ils limitent les risques d'alcali réaction et possèdent des modules de compressibilité plus proche de la pâte de ciment que les granulats siliceux. La réaction entre le CaCO_3 provenant des granulats calcaires et les aluminates tricalciques et les alumino-ferrites tétracalciques engendrent une formation de monocarbo-aluminates de calcium ($[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}]_2 \text{CO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$). Ainsi, la zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est ainsi plus résistante et de perméabilité plus faible [Gaweska 2004]. L'augmentation de la résistance du matériau béton obtenue avec les granulats de cette nature a été observée par [Malier 1992], contrairement aux granulats de type quartz (comme les granulats siliceux) qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment.
- **Dimensions, volume et forme des granulats** : la taille des granulats a une influence sur les propriétés de résistance et de durabilité des bétons [Gonilho Pereira 2009]. Bien que l'utilisation de gros granulats permet de diminuer la demande en eau (faible surface à mouiller par unité de masse), ce qui va dans le sens de l'augmentation de la résistance, il n'est pas recommandé d'en utiliser dans les BHP, car ils se comportent comme des inclusions rigides de grandes dimensions, induisant des systèmes d'auto-contraintes importants. Ils altèrent également les capacités de déformations différées et les propriétés thermiques. Il est admis que

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

ces risques sont limités tant que la dimension maximale est inférieure à 10 ou 12 mm [Neville 2000]. Nichols [Nichols 1982] a établi que, pour chaque résistance de béton et donc pour chaque rapport eau/ciment, il existe une dimension maximale optimale pour le granulat. De même, le volume des granulats possède un effet sur les propriétés mécaniques du béton. D'après Stocks et al [Stocks 1979], les propriétés mécaniques (résistance en compression et module d'élasticité) augmentent avec la proportion de granulats, du moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulats (60-75% en volume) [Demirboga 2001], [Yasar 2003]. Quant à la forme, l'utilisation de granulats concassés permet d'obtenir des meilleurs comportements mécaniques comparativement aux formes roulées [Ladaoui 2010].

- **L'optimisation de la distribution granulaire** : elle permet d'augmenter la densité du squelette granulaire final et par conséquent d'obtenir un béton compact ayant de bonnes propriétés mécaniques. Parmi les méthodes d'optimisation de la répartition granulaire d'un béton, on peut citer [Bolomey 1935], [Caquot 1937], [Fauray 1953], [Powers 1968] et plus récemment le modèle d'empilement compressible (MEC) [de Larrard 2000] mis au point au LCPC.

I.4.2.2. Granulats artificiels

Comme les trois quarts 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 mais selon leurs propriétés ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton. (En fait on ne peut pas confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres).

Le recours aux granulats artificiels permet de formuler des bétons de densité réduite mais de coût élevé. Les granulats provenant des sous-produits industriels présentent des matériaux dont la valorisation permet plusieurs avantages: Economique, technologique et écologique. Les granulats coûtent beaucoup moins cher que le ciment, il devient alors économique d'en inclure la plus grande quantité possible dans le béton, contrairement au ciment. Cependant l'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats. Car, ces derniers confèrent au béton une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment [Neville 2000].

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.4.2.2.1. Scorie : sont des déchets solides provenant des opérations de traitement des minéraux métalliques ou de l'affinage de certains métaux, elles surnagent le métal en fusion. Les scories sont de taille variée, du gros bloc au matériau pulvérulent.

Ils ont aujourd'hui utilisées uniquement sous forme d'agrégats dans la construction de routes et leur future utilisation dans le béton pourrait être intéressante. À ce jour, plusieurs études ont été menées sur l'utilisation de scorie comme agrégat dans le béton [Maslehuddin 2003], [Beshr 2003], [Manso 2006], [Wu SP 2007], [Asi IM 2007], [Pellegrino 2009], [Samir 2012], [Mauthoor 2016]. Selon les études publiées, les granulats de scories ont une bonne résistance mécanique et une densité spécifique élevée (3,6 en moyenne), principalement en raison de leur teneur élevée en oxyde de fer. En Europe, plusieurs études ont intéressent sur l'utilisation de granulats de scorie dans le béton, en cite par exemple le Labein-Tecnalía Kubik en Espagne [Arribas 2010], dans les chaussées et dans le béton autoplaçants en Grèce [Lykoudis 2010], [Papayianni 2010]. Cette nouvelle façon de valorisation aiderait à atteindre plusieurs objectifs non seulement pour la préservation des ressources naturelles, mais aussi pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du produit final [CJ Shi 2004]. La possibilité d'utilisation de sous- produit dans la construction dépend essentiellement de la composition chimique, volume stabilité et les caractéristiques physiques [Frías Rojas 2002]. La composition chimique de scorie d'acier varient considérablement selon les processus de production d'acier et les matières premières utilisées, généralement les scories se compose de : 45-60% de CaO, 10-15% de SiO₂, 1-5% de Al₂O₃, 3-9% de F₂O₃, 3-13% de MgO, 7-20% de FeO, et 1-4% de P₂O₅ [Shi, Wu],[Hu, Wang]. Certaines recherches aussi ont été menées sur l'utilisation des scories comme addition minéral dans le béton [Sun JY 2003], [Peng 2010]. Cependant, le taux d'utilisation de scorie en tant que addition est très faible, à cause des propriétés cimentaire des scories [Wang Qiang 2012].

I.4.2.2.2. Laitier cristallisé : Suivant le processus du refroidissement du laitier fondu on obtient deux produits différents :

- Le laitier granulé obtenu par refroidissement rapide dans l'eau.
- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent à l'air.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Selon Aïctin [Aïctin 1966] le laitier cristallisé de hauts fourneaux constitue un excellent agrégat à béton que l'on aura intérêt à utiliser sous forme de graviers plutôt sous forme de sable fin.

Donc, le laitier cristallisé concassé, constitue un excellent granulat pour béton. Le laitier cristallisé étant utilisé après concassages et criblages comme granulats dans la fabrication de matériaux d'assises de chaussées (grave laitier tout laitier). Les propriétés physiques et mécaniques de laitier cristallisé concassé induisent un large éventail d'usage dans le bâtiment, les ouvrages d'art, le génie civil et les routes.

I.4.3. Additions minérales

Les ajouts minéraux sont des poudres d'une finesse supérieure à celle du ciment, ils peuvent être substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajouté directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Ils permettent ainsi d'améliorer notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques [Anissa Bessa 2004].

Ajouter une ou plusieurs additions minérales en complément ou en substitution partielle d'une certaine quantité de ciment est une alternative très intéressante du point de vue des résistances mécaniques et de la rhéologie. Les aspects économiques et environnementaux ne sont pas à négliger non plus : dans le cas d'une substitution, le coût de l'ajout est généralement inférieur à celui du ciment et les ajouts présentent généralement des bilans carbones meilleurs que ceux du clinker. De nombreuses additions minérales contiennent de la silice vitreuse réactive qui, au contact de l'eau et en présence de chaux, développe une réaction pouzzolanique pour former des C-S-H [Dron 1982]. Il est important de noter que la vitesse à laquelle se développe la réaction pouzzolanique dépend de la température et de la finesse de la pouzzolane. Cette réaction peut être lente et peut parfois se développer sur plusieurs semaines. La réaction pouzzolanique existe non seulement avec la fumée de silice, mais aussi avec les cendres volantes ainsi que certains constituants des laitiers de haut fourneau.

I.4.3.1. Effet des additions minérales.

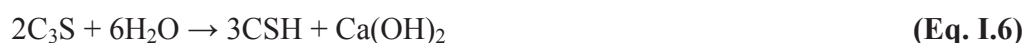
A) Effet filler ou effet de remplissage : l'incorporation des additions minérales modifie la structure du squelette (empilement des grains de différentes tailles et intensité des frictions entre les particules). L'effet granulaire peut avoir des conséquences favorables sur la compacité, la capacité d'écoulement et la stabilité des mélanges frais.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

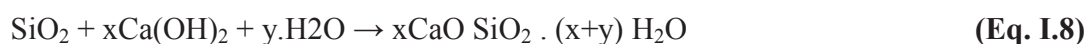
B) Effet physico-chimique et microstructural : concerne les modifications induites par la présence des particules d'addition minérale sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés [Neville 2000], [Kara-Ali 2002], [Lakhal 2011].

C) Effet chimique ou pouzzolanique : concerne les propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques des additions minérales, la silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit, en présence de l'eau, avec la portlandite formée durant l'hydratation du ciment pour former des C-S-H. Les étapes de formation de portlandite et des C-S-H secondaires sont données si dessous:

- Formation de la portlandite:



- Réaction pouzzolanique:



La formation des S-C-H accroît les résistances mécaniques et améliore les performances microstructurales des bétons [Anissa Bessa 2004].

I.4.3.2. Différent types d'additions

La réaction pouzzolanique existe non seulement avec la fumée de silice, mais aussi avec d'autres additions minérales actives telles que les laitiers de haut fourneaux et les cendres volantes. Nous nous intéressons ci-dessous aux caractéristiques de deux types d'additions qui sont la fumée de silice et le laitier granulé.

I.4.3.2.1. La fumée de silice

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et de différents alliages de silicium. C'est une silice amorphe presque pure [Bache 1981] qui peut contenir un pourcentage très faible d'impuretés. La silice représente environ 90% de la composition chimique [Aïtcin 2003]. Les particules ont une forme sphérique de diamètre compris entre 0,1µm et 2µm. La fumée de silice est une pouzzolane très réactive de par son état amorphe et son extrême finesse [Traetteberg 1978]. L'effet pouzzolanique de la fumée de silice se traduit par une pâte de ciment

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

durcie dense. En outre, sa grande finesse procure un effet physique de remplissage (effet filler) [Khayat 1996].

➤ *Influence sur les propriétés du béton frais:*

D'un point de vue rhéologique, les petites particules sphériques, bien dispersées dans le système eau-ciment, peuvent déplacer les molécules d'eau piégées à proximité des grains de ciment et les libérer pour qu'elles puissent contribuer à fluidifier le béton. La combinaison des différents modes d'action de la fumée de silice dans le béton permet la formation d'une microstructure très dense [Durekovic 1995]. Toutes ses caractéristiques font de la fumée de silice une ultra fine très intéressante à la fois du point de vue physique et chimique [De Larrard 1988], faisant d'elle un produit très répandu dans la fabrication des BHP [Sellevold 1987].

L'emploi de la fumée de silice nécessite obligatoirement d'un superplastifiant qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice. Sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau. Car les ions de calcium Ca^{+2} , libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel ; cette structure diminue fortement la maniabilité du béton [Gaher 2004].

Ferraris [Ferraris 2001] montrent que l'utilisation de la fumée de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou bien pour des bétons. L'incorporation de fumée de silice rend parfois le béton collant, bien que les avis soient partagés sur cet aspect. Pour certains auteurs [Shi 1998], [Ferraris 2001], [Park 2005], elle augmente le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges. En revanche, Carlsward et al [Carlsward 2003] constatent que la fumée de silice ne modifie pas la viscosité par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence. L'effet de la fumée de silice sur les propriétés physiques des bétons est très marqué surtout pour de faibles rapports E/L [Persson 1998]. L'emploi de la fumée de silice sert à réduire les phénomènes de ressuage et de ségrégation, ceci favorise l'accélération de la finition des surfaces [Amouri 2009].

➤ *Influence sur les propriétés du béton durci :*

L'utilisation de la fumée de silice améliore considérablement les résistances en compression des BHP [Persson 1992, 1998], [Manai 1995]. La porosité est considérablement réduite à l'interface pâte-granulats comparée à celles des BO [Hassan 1998]. Les propriétés de transport

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

(perméabilité au gaz, absorption d'eau et diffusion des ions chlorures) des BHP avec fumée de silice sont améliorées. Grâce à l'utilisation de fumée de silice la perméabilité des BHP a été réduite de 71% après une journée et de 87% à 365 jours de murissement [Hassan 2000]. Ces améliorations sont dues à la fois à la réaction pouzzolanique par transformation d'une partie de l'hydroxyde de calcium en C-S-H et à l'effet filler (effet de colmatage d'une partie de la porosité).

Le dosage optimal en fumée de silice utilisé pour l'obtention de hautes résistances se situerait aux alentours de 10% du poids de ciment [Mazloom 2004].

Cependant, le niveau de performances atteint par l'ajout de fumée de silice et leur prix excessif (5 à 10 fois plus cher que le ciment) [Aïtcin 2001], 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.

I.4.3.2.2. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est constitué de chaux (45 à 50 %), de silice (25 à 30 %), d'alumine (15 à 20 %) et d'environ 10% de magnésie, d'oxydes divers et de manganèse. Comme pour la fumée de silice, le laitier peut être ajouté soit directement dans la composition du ciment (cas du ciment CEM II), soit vendu séparément et introduit dans la composition des bétons en tant qu'ajout [Behim 2002], [Sobolev 2005]. Le laitier présente des caractéristiques intéressantes en tant qu'addition minérale [Hinrichs 1989] surtout par rapport à la constance de sa composition chimique. D'après Park [Park 2005], le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment. Shi et al [Shi 2002] avaient montré que le laitier de haut fourneau adsorbe le superplastifiant, ce qui impliquerait une demande plus importante en superplastifiant pour obtenir une même fluidité ou une même valeur du seuil de cisaillement [Bethmont 2002]. L'autre avantage d'une substitution du laitier est la réduction des pics de température causés par l'hydratation. Cet avantage dépend toutefois de la finesse du laitier.

L'utilisation du laitier granulé reste cependant limitée en Algérie au domaine de la cimenterie en raison de son pouvoir hydraulique. L'utilisation de filler de laitier granulé comme addition minérale améliore la compacité, réduit la porosité capillaire et présente une faible chaleur

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

d'hydratation et offre une perméabilité décroissante ceci permet de réduire le risque de fissuration lors de retrait thermique et améliore la durabilité vis à vis des agents agressifs [Kolani 2012]. La matrice cimentaire présente une porosité capillaire plus faible et les BHP à base de laitier ont une résistance élevée à la diffusion des ions chlorure.

Le BHP 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, ... 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 (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...).

➤ *Influence sur les caractéristiques des bétons frais*

Les BHP contenant du laitier granulé présentent une ouvrabilité améliorée par rapport au béton conventionnel, ceci est la cause des caractéristiques des surfaces du filler de laitier granulé qui servent à un glissement intergranulaire dans la pâte [Manai 1995], aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de filler de laitier granulé au début du malaxage.

Venuat [Venuat 1976], explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Ainsi les chercheurs trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton.

➤ *Influence sur les caractéristiques des bétons durcis*

Les bétons avec filler de laitier granulé développent des résistances mécaniques plus élevées que les bétons ordinaires au bout de sept jours, ainsi une durabilité améliorée vis-à-vis des milieux agressifs [Venuat 1976], [Amouri 2009].

I.4.4. Superplastifiant

L'apparition des bétons à hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP) [Nakamura 1999], [Bury 2002]. L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment,

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les polymères avec ces parties anioniques servent à neutraliser les différentes charges ce qui donne une charge négative à la surface de ciment [Jolicoeur 1998]. Ceci conduit à une répulsion électrostatique entre les particules voisines de ciment et sert à la défloculation et la dispersion des solides dans la suspension. On peut dire aussi que la dispersion des solides dans la suspension peut être engendré par un effet stérique, ce qui crée des chaînes secondaires griffées sur la chaîne principale du polymère et repoussent les grains de ciment par effet stérique ou entropique [Uchikawa 1997]. Plus la longueur de ces chaînes est importante est plus l'effet stérique est important (figure I.1)

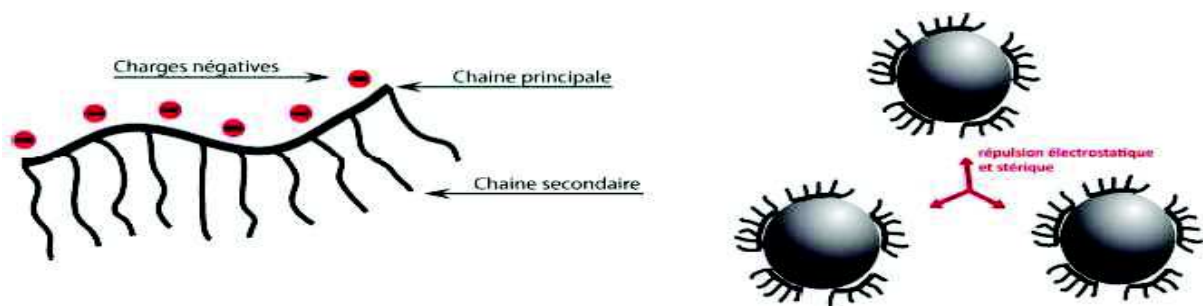


Figure I.1. Répulsion électrostatique et stérique entre des particules de ciment [Diederich 2010].

Ainsi le seuil de cisaillement et la viscosité d'un mélange cimentaire diminuent avec l'ajout d'un superplastifiant [Fares 2009]. Toutefois, l'influence d'un superplastifiant sur le comportement de la pâte dépend de son dosage, de ses caractéristiques et de son mode d'utilisation. En effet, [Flatt 2001] expliquent que le superplastifiant ajouté à une suspension de ciment est divisé en trois parties. La première partie est (consommée) par la réaction chimique de l'hydratation, plus particulièrement par la formation des phases C-S-H. La deuxième partie est adsorbée sur les phases hydratées des particules de ciment. La troisième partie du superplastifiant est celle qui reste disponible dans la solution interstitielle entre les particules de ciment. Ainsi, le dosage du superplastifiant à ajouter à une suspension cimentaire doit être suffisant pour permettre à une quantité de rester disponible dans la solution interstitielle, contribuant à obtenir une fluidité plus grande, et qui dure plus longtemps avant le début de prise de la suspension. Bonneau [Bonneau1997] explique l'utilité de cette dernière partie par le besoin d'une quantité en réserve pour couvrir les surfaces naissantes et pour remplacer les molécules consommées par complexation [El Barrak 2005].

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

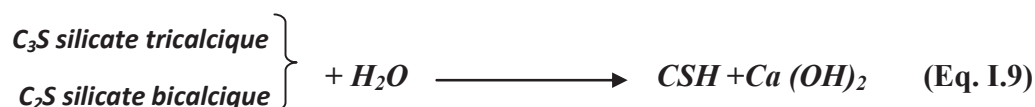
I.5. Microstructure des BHP

La complexité de la microstructure du béton est une des causes de son comportement mécanique particulier lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques...). Si on cherche à comprendre en particulier les mécanismes de durabilité, il faut, dans un premier temps, connaître les propriétés des éléments le constituant et sa structure aux différentes échelles.

On distingue trois phases dans le béton en incluant la porosité de chacune des phases :

- la pâte de ciment durcie (matrice cimentaire),
- Les granulats (gravillons et sable),
- L'interface pâte/granat.

- La pâte de ciment durcie représente habituellement 25 à 40 % du volume total du béton et forme ce que l'on appelle la matrice cimentaire du matériau. Celle-ci joue le rôle de colle et confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance. Cette matrice est constituée principalement d'hydrates qui sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de particules anhydres. Plus la présence de l'eau interstitielle et les vides remplis d'air et/ou de vapeur d'eau. Les constituants du ciment en présence d'eau transforment en hydrates qui précipitent et donnent une structure mécaniquement résistante. Les principaux hydrates formés sont les suivants: silicate de calcium hydraté (C-S-H), Portlandite Ca(OH)_2 , aluminates de calcium hydraté et l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{A}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment est présentée par l'équation suivante :



Dans les bétons ordinaire la pâte de ciment durcie contient 50-70% de C-S-H (figure I.2) et 25-27% de Ca(OH)_2 (figure I.1) par contre dans le cas des bétons à hautes performances, la quantité des C-S-H est encore plus importante, ce qui induit une augmentation de la résistance [Meno 2004], [Haniche 2011].

Par contre, la portlandite Ca(OH)_2 n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique parce que ses cristaux de taille importante sont susceptibles de limiter la résistance en compression sur béton. De plus, la portlandite est facilement soluble dans l'eau, ce qui diminue

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

la durabilité du béton [Hage 2004]. Donc, afin de diminuer la quantité de portlandite, on peut ajouter de la fumée de silice au ciment. La fumée de silice réagit avec la portlandite selon une réaction pouzzolanique qui est présentée par l'équation suivante.



Elle consomme donc de la portlandite et forme des CSH supplémentaires [Huan 1985]. La fumée de silice, du fait de la taille de ses grains, inférieure à celle de grains de ciment augmente également la compacité de la matrice. Ceci conduit à une amélioration des performances mécaniques du béton.

Il est intéressant de décrire de manière plus fine la constitution du CSH, ainsi que la répartition et les formes prises par l'eau dans la porosité et la microstructure de la pâte de ciment parce que cette eau représente un élément essentiel dans le comportement de la matrice cimentaire.

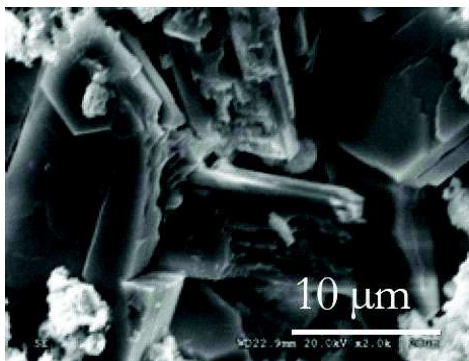


Figure I.2. Cristaux de Portlandite.

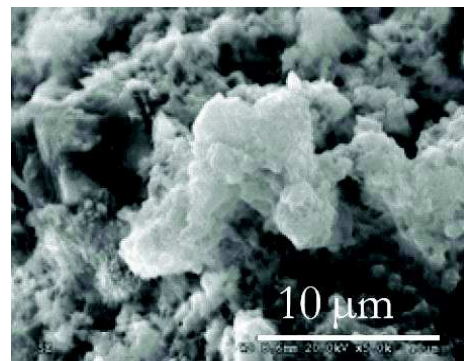


Figure I.3. Gel de CSH.

Les C-S-H

Les silicates de calcium hydratés, appelés communément CSH, de composition $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)_y(\text{H}_2\text{O})_z$ où les valeurs de x , y et z dépendent de la teneur en calcium et en silicates dans la phase aqueuse [Viallis-Terrisse 2000]. Le paramètre le plus courant pour caractériser la stœchiométrie de ces matériaux est le rapport entre le nombre d'atomes de calcium et le nombre d'atomes de silicium dans la structure : le rapport C/S. Ce rapport varie entre 0.7 et 2.0 dans les CSH [Klur 1996]. Les CSH sont répartis en quatre types morphologiques par les observations microscopiques [Diam 1986] :

- **Type I** : ils se présentent en feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux et rayonnent autour du grain de ciment. Cette cristallisation aciculaire recouvre

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

progressivement les grains anhydres et leur donne un aspect dit « en hérisson ». Cette morphologie fibreuse est surtout visible aux premiers âges de l'hydratation.

- **Type II** : ils se présentent sous forme alvéolaire (nid d'abeilles).

Les types I et II cristallisent en début de prise dans l'espace disponible entre les grains anhydres.

- **Type III** : ils apparaissent souvent comme des petits disques ou des sphères assemblées pour former des particules plus massives sans forme particulière. On les trouve dans des pâtes matures.

- **Type IV** : il s'agit d'une structure particulièrement dense et amorphe.

Les types III et IV seraient plutôt des hydrates tardifs qui occuperaient la place des grains anhydres d'origine ; ils sont appelés pour cela hydrates internes [Diam 1986].

- Les granulats (sables, gravillons) occupent 60 à 75 % du volume du béton. Ils jouent les rôles de remplissage atténuateurs de variations volumiques et sont sources de résistance mécanique puisqu'ils se caractérisent généralement par des performances notamment en compression supérieures à celle de la pâte.
- 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 [Maso 1980], [Nguyen 2013]. Elle constitue une zone de moindre résistance des bétons soumis à des sollicitations mécaniques. Les propriétés de ces phases ont un rôle dans les comportements à long terme des bétons. La zone d'interface pâte-granulat est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Cette zone offre donc un chemin préférentiel pour le passage de l'eau, des gaz ou des ions. L'épaisseur de cette zone augmente avec la grosseur du granulats et avec le rapport E/C, mais reste, dans tous les cas inférieur à 50 μm , cette particularité des matériaux cimentaires est attribuée à un excès local d'eau : un film liquide se forme sur la surface du granulats au moment de gâchage, modifiant la liaison (nature et orientation des hydrates formés) qui s'établit un cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et le granulats.

La qualité de la zone de transition dépend fortement de la nature des granulats. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pâte de ciment. 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 [Hage 2004]. La zone

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est ainsi plus résistante et de perméabilité plus faible. L'augmentation de la résistance du béton réalisé avec les granulats de cette nature a été observée par [Maso 1982] contrairement à celle du béton de granulats de type quartz. Ces derniers granulats sont neutres par rapport à la pâte de ciment. Les liaisons entre la pâte et les granulats concassés sont plus fortes qu'avec des granulats roulés [Meth 1986].

La résistance de la liaison augmente aussi avec l'âge du béton puisqu'elle dépend autant de la résistance de la pâte de ciment hydraté que des propriétés de surface du granulat. La résistance de la liaison et la résistance de la pâte de ciment hydraté peuvent augmenter avec l'âge, de sorte que la fissuration ne s'initie plus à l'interface pâte/granulat. Ce n'est plus alors la résistance de la liaison qui contrôle la résistance du béton.

1) l'interface pâte/granulat dans le cas des bétons ordinaires :

Dans le cas des bétons traditionnels, qui sont réalisés avec des roches non poreuses ou très peu poreuses, la plus forte porosité de l'auréole crée des hétérogénéités microstructurales qui ont de sérieuses répercussions sur la résistance du béton. En effet, elle est à la fois une zone plus faible et plus sollicitée du fait des concentrations de contraintes générées par les discontinuités et défauts. L'auréole de transition joue le rôle de maillon faible du béton et par conséquent, quand le béton est soumis à une certaine contrainte, les fissures commencent à se développer dans cette zone de transition [Nevi 1993], [Bran 1995]. Diamond [Diam 1986] décrit cette zone comme une structure complexe, présentée dans la figure I.4.

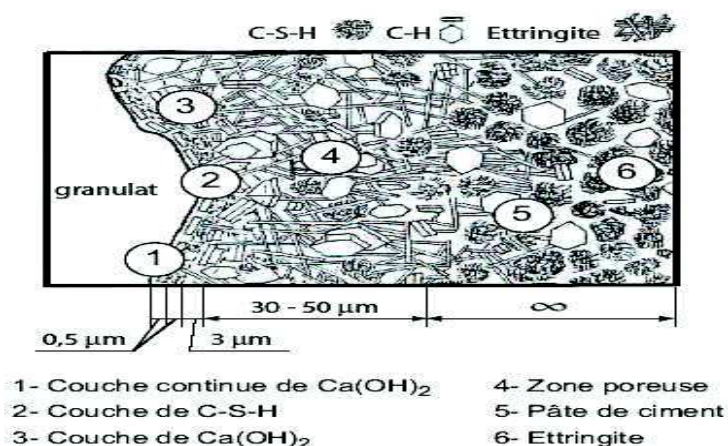


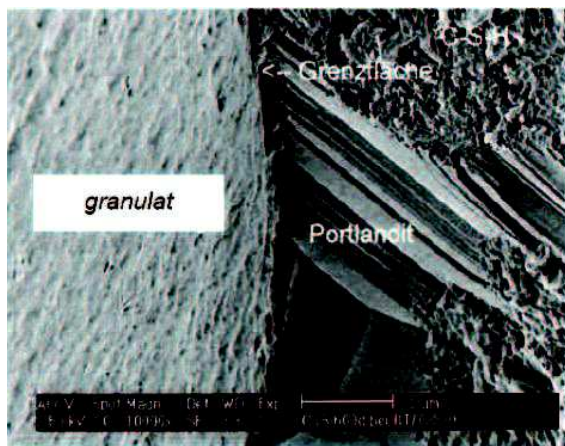
Figure I.4. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un Béton Ordinaire [Diam 1986].

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

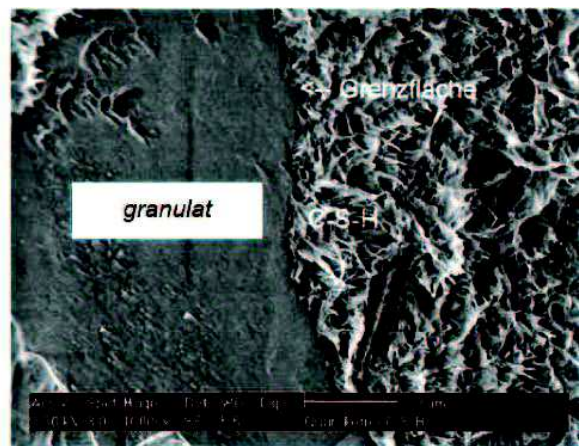
Il y a une première couche, au contact du granulat, très compacte et composée de cristaux de portlandite orientés perpendiculairement aux granulats. La deuxième couche d'épaisseur $0,5 \mu\text{m}$ est composée de feuillets de C-S-H. Après la deuxième couche de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nous passons dans la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécanique que la matrice. Cette zone est donc constituée par des fibres de CSH, d'aiguilles d'ettringite, et de plaquettes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ orientées perpendiculairement à la surface du granulat. Des études ont pu démontrer que la zone d'interface est riche en particules plus fines de ciment et qu'elle a un rapport E/C plus élevé que l'ensemble de la pâte de ciment [Nevi 1993].

2) l'interface pâte/granulat dans le cas des bétons à hautes performances :

L'épaisseur de l'auréole de transition pour les BHP est limitée à $12 \mu\text{m}$ [De Sa 2007]. Grâce à l'utilisation de la fumée de silice qui permet de la consommation de la portlandite, les BHP présente une structure dense ce qui élimine la présence de la zone de contact [Aitcin 2003] (Figure I.5.b). La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport E/L, Lorsque ce rapport augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante [Vive 1997].



(a) Béton sans fumée de silice



(b) Béton avec fumée de silice

Figure I.5. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat [De Sa 2007].

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.6. Méthode de formulation

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible [Aitcin 2001]. En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Bien que les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton. A ce titre il y a lieu de présenter quelques méthodes de formulation.

- La méthode de L'Université de Sherbrooke [Aitcin 2001].
- Méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993).
- Méthode proposée par de Larrard (dite des coulis du LCPC en 1990).
- Méthode présentée par Mehta et Aitcin(1990).

I.6.1.La méthode de l'université de Sherbrooke:

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné, elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton [Aitcin 2001]. Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus.

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés:

- Le rapport eau / liant.
- Le dosage en eau.
- Le dosage en super plastifiant.
- Le dosage en gros granulat.
- La teneur en air.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A) Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la figure I.6 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la figure I.6 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau [Aitcin 2001].

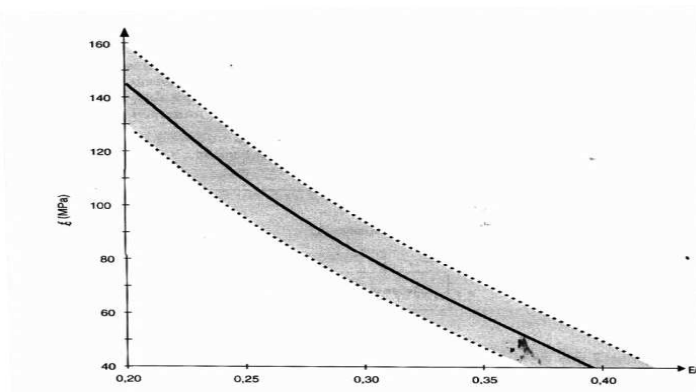


Figure I.6. Abaque de détermination du rapport E/L [Aitcin 2001].

B) Dosage en eau:

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier [Aitcin 2001].

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience [Rougeron et Aitcin 1994].

La figure I.7 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 L /m³ [Aitcin 2001].

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Point de saturation	0,6	0,8	1	1,2	1,4	%
Dosage en eau	120	125	135	145	155	l/m^3
	125	135	145	155	165	

Figure I.7. Détermination du dosage en eau [Aitcin 2001].

C) Dosage en superplastifiant:

Le dosage en super plastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en super plastifiant égale à 1.0%.

D) Dosage en gros granulat:

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure I.8 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m^3 .

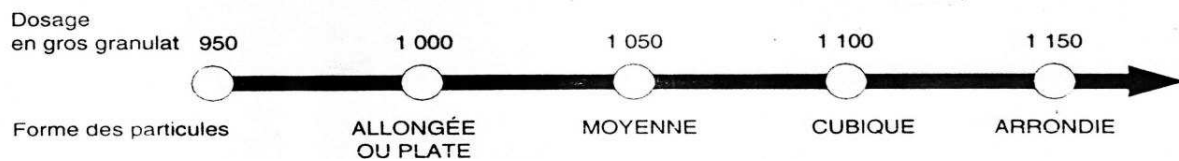


Figure I.8. Dosage en gros granulat [Aitcin 2001].

E) Teneur en air:

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel-dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP, l'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.7. Performance mécanique des BHP

I.7.1. Résistance mécanique

L'utilisation des fillers dans la formulation des BHP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [De Larrard 1999], [Pera 1999]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défoulées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Les granulats jouent un rôle important dans le comportement mécanique des BHP. Plusieurs études consacrées sur l'effet des granulats sur la résistance mécanique des BHP [Poitevin 1999], [Beshr 2003], [Ergu'l 2004], [Al-Oraimi 2006], [Kilic 2008], les auteurs montrent que la nature minéralogique des granulats naturels influence considérablement la résistance mécanique. Les granulats calcaires 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 [Gaweska 2004]. L'augmentation de la résistance du béton obtenue avec les granulats calcaire a été observée par [Malier 1992], contrairement aux granulats de type quartz (comme les granulats siliceux) qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment.

L'utilisation des granulats artificiels dans les formulations des BHP donnent des résistances mécaniques supérieures à celle des BHP avec granulats naturels. Plusieurs études abordé le sujet de la comparaison entre les bétons formulés avec granulats naturels à ceux avec granulats artificiels [Bashir2003], [Maslehuddin 2003], les auteurs montrent que les bétons avec granulats artificiels présentent les meilleures caractéristiques physiques, mécaniques par rapport à celle avec granulats naturels.

Qasrawi et al, a constaté que l'utilisation de granulat de scorie augmente la résistance du béton, en particulier la résistance à la traction [Qasrawi 2009].

I.8. Propriétés physico-chimiques et 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 d'un matériau poreux comme le béton. Il est généralement admis qu'un béton durable est un béton résistant aux agressions. La

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

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 qui représente une barrière ouverte au milieu extérieur, permettant ainsi le passage des différents agents agressifs. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméation, la diffusion et l'absorption. La perméation concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'effet d'un gradient de concentration. La grandeur qui lui est associée est la diffusion des ions chlorures. et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. La carbonatation est un phénomène de dégradation spécifique accélérées qui traduit des désordres causés dans le béton par la carbonatation naturelle.

Les BHP se caractérisent par l'ajout d'une quantité d'additions minérales. Les additions minérales développent une microstructure différente de celle développée par un ciment portland ordinaire. Ceci 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 diminué l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros et de sa finesse, mais aussi du mode d'introduction de l'addition par substitution et/ou ajout [Assié 2004].

I.8.1.Porosité

La porosité d'un béton, est un paramètre important dont la durabilité en termes d'attaques d'agents agressifs. Les bétons sont des matériaux cimentaires plus ou moins poreux. La porosité diminue au fur et à mesure de l'avancement du processus d'hydratation à cause de remplissage des pores par les hydrates formés. Dans la matrice cimentaire on peut distinguer deux familles de pores: les pores relatifs aux capillaires et les pores relatifs aux hydrates.

- *Les pores capillaires* : ce sont les vestiges des espaces intergranulaires de la pâte fraîche. Ils peuvent être ou non remplis d'eau et leur volume décroît au cours de l'hydratation pour un rapport eau/ciment donné [Bill 2003]. Leur dimension caractéristique se situe dans la plage 0.01-50 μ m [De sa 2007].
- *La porosité intrinsèque aux CSH* : cette porosité concerne une échelle encore plus petite. Sa dimension caractéristique, de l'ordre du nanomètre, est beaucoup plus faible que celle de la

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

porosité capillaire. Les représentations qui en sont faites distinguent, en général, deux types de pores [Baro 1994].

1. Les pores inter-cristallites (espace inter-lamellaires) qui sont situés entre les particules de gel.
2. Les pores intra-cristallites (espace inter-feuillets) qui sont situés à l'intérieur même des particules de gel, il s'agit d'espaces extrêmement petits de quelques Angströms de largeur.

Les BHP sont des bétons contient des additions minérales, son réseau poreux dépend de la nature et de l'intensité de l'effet physico-chimique, microstructural et éventuellement chimique de ces additions [Kaikéa 2015]. Les BHP fabriqués avec ajout de laitier granulé ont une porosité plus importante, aux jeunes âges, du fait de leur réaction hydraulique latente. Par contre à long terme, l'effet chimique peut permettre une diminution notable de la porosité (à condition que la réaction se déroule dans une cure efficace) [De Larrard 2002]. L'ajout de la fumée de silice permet de réduire de manière appréciable la porosité, si le rapport E/C est maintenu constant, la dimension des plus gros pores diminue.

De plus, les BHP sont formulé par l'emploi conjoint de superplastifiants et d'addition minérale avec diminution du rapport E/L, cela permet d'obtenir un béton de porosité réduite et de qualités très améliorées [Baroghel- Bouny 1998].

Il est important aussi de mentionner que l'utilisation des granulats artificiels augmente de manière significative le volume ou le nombre des pores par rapport aux granulats naturels [Samir 2012] et [Adegoloye 2015].

I.8.2. Absorption d'eau

L'absorption d'eau est le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires. L'absorptivité est influencée par le rapport eau/ciment (E/C), le taux de saturation des pores et la composition du liant, notamment, la nature du ciment et des additions minérales [Bessa- Badreddine 2004]. L'introduction des additions minérale à une teneur inférieure à 30% conserve la structure poreuse de la matrice cimentaire et permet de maintenir sa complexité vis-à-vis de la tortuosité et de la constrictivité indépendamment de la nature de l'addition.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le paramètre granulat joue un rôle dans l'absorptivité de bétons, plusieurs études abordent le sujet de l'influence des granulats artificiels sur la capacité d'absorption d'eau de béton.

En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

I.8.3. Perméabilité aux gaz

La mesure de la perméabilité aux gaz permet de quantifier la mobilité d'un fluide à travers un béton dans sa globalité. Elle donne une information claire sur l'inter connectivité et la tortuosité du réseau poreux. Par conséquent, les méthodes et résultats de mesure choisis et rapportés ici sont ceux de la perméabilité aux gaz et plus particulièrement à l'oxygène.

Cependant, le béton est un matériau dont les propriétés évoluent dans le temps et pour lequel la dessiccation a pour effet de modifier le réseau poreux, ce réseau est plus complexe qu'il n'y apparaît avec les termes de tortuosité et de connectivité et qui ne se résume pas uniquement à la valeur de porosité et de la taille de pores.

En effet, on peut classer les pores en trois familles [Mehta 1993], [Assié 2004] :

- *Les pores interconnectés* : forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.
- *Les pores aveugles ou bras morts* : ces pores sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport de matière à travers le matériau.
- *Les pores isolés* : ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

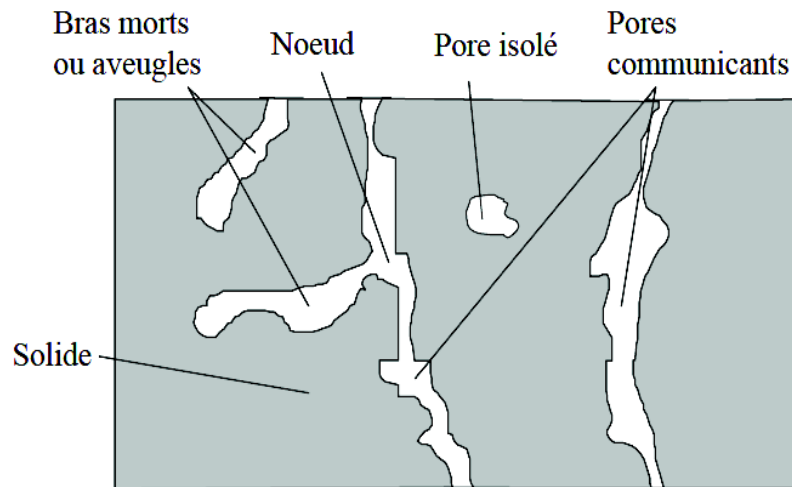


Figure I.9. Représentation schématique d'un béton poreux [Assié 2004].

La perméabilité est une propriété de transfert qui caractérise la durabilité du béton et qui peut être recherchée en tant qu'indicateur de cette dernière. Ainsi, l'utilisation de la mesure de la perméabilité est largement répandue pour caractériser la durabilité du béton.

Les additions minérales améliorent la compacité de la matrice cimentaire, cette amélioration conduit à l'augmentation de la résistance mécanique et la diminution de la perméabilité, car les additions minérales servent à réduire le diamètre des pores et multiplient les petits pores. [Perlot 2005]

D'après Shi *et al* [Shi 2009] qui ont réalisé des études sur des bétons à hautes performances à base de laitier granulé et de fumée de silice avec plusieurs taux de substitution l'influence de la fumée de silice sur la perméabilité au gaz est affectée par le rapport E/L, mais la perméabilité au gaz des BHP avec le laitier granulé est indépendante de ce rapport. Les auteurs concluent que pour un dosage de 30% de fumée de silice on obtienne une légère amélioration de la perméabilité au gaz. L'ajout de filler de laitier à des dosages de 30% améliore le coefficient de perméabilité au gaz, au-delà de ce taux, la perméabilité au gaz augmente légèrement. D'autres auteurs [McCarthy 2005] révèlent que l'incorporation de fumée de silice et du laitier granulé peut avoir une réduction significative sur la perméabilité au gaz des bétons ordinaires pour des rapports E/L constants.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Il faut mentionner aussi que l'utilisation des granulats artificiels augmente de manière significative la perméabilité de béton. [Wang 2013], [Adegoloye 2014], ont étudié la perméabilité des BHP à base de granulats de scorie, les auteurs montrent que les BHP avec granulats de scorie sont plus perméables par rapport à ceux avec granulats de calcaire. Mais les valeurs de la perméabilité restent dans les normes.

I.8.4. Diffusion des ions chlorure

La diffusion est le résultat d'un transfert de matière dans le béton par l'intermédiaire d'un réseau poreux sous l'effet d'un gradient de concentration. Lorsque les ions chlorure se retrouvent en concentration minimale dans l'eau interstitielle du béton, ils provoquent une diminution du pH au voisinage. La diffusivité liée à la structure du réseau poreux, à sa tortuosité et à sa connectivité qui sont influencées par l'ajout des additions minérales [Perlot 2005]. L'emploi de ces additions réduit la diffusivité. Cependant, ce postulat ne reçoit pas l'unanimité de tous les auteurs.

Plusieurs auteurs [Thomas 1999], [Ellis 1991], [Hassan 2000], [Ampadu 1999], [Audenaert 2003], [Nguyen 2006] ont étudié l'influence des additions minérales sur la diminution de la porosité et la taille des pores, ils ont montré que le coefficient de diffusion est diminué par une cure humide suffisamment longue qu'au-delà de 91 jours ce qui relie la diffusivité à la diminution de la porosité due aux réactions pouzzolaniques.

En effet, une étude de Béjaoui [Béjaoui 2001] qui s'articule sur l'impact des additions minérales sur le développement de la porosimétrie des pâtes. Leur étude montre que la porosité totale des pâtes contenant des additions est plus importante que celle des pâtes sans additions, D'après les démonstrations de Béjaoui, on conclut que la diffusion reliée à la répartition de la taille des pores et non pas à la porosité totale.

I.9. Conclusion générale

En 1969 Parrott [Parrott 1969], avait montré qu'il était très possible de faire des bétons de résistance mécanique en compression après 28 jours de l'ordre de 80 MPa avec un ciment classique, sans adjuvant en diminuant le plus possible le rapport eau/liant et en augmentant le dosage en liant. Par cet artifice on diminue la porosité initiale du matériau.

L'insertion des BHP dans le domaine de la construction est rendue possible par les nombreux avantages que présentent leurs utilisations dans le secteur technique et socio-économique. Ce

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

nouveau matériau possède une bonne ouvrabilité et des propriétés mécaniques élevées donc une excellente durabilité.

Les roches naturelles sont la source principale de granulats pour les bétons et les formulations actuelles visent à augmenter la part de ces granulats par ailleurs, l'utilisation des granulats artificiels restent relativement limitée ou même abandonné. Cependant l'utilisation des granulats qui devient de sous-produit industrielle est très motivé en terme de performances mécaniques et de durabilité et offre une nouvelle approche de la valorisation des sous-produits artificielle et conserver les ressources naturelles.

Les BHP sont obtenues par l'emploi des superplastifiants et l'utilisation des ajouts cimentaires finement broyés qui comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide en rendant possible la diminution de la quantité d'eau. Là justement se dégage de façon explicite le rôle propre du superplastifiant qui est essentiellement de défloculer les grappes d'ultrafines qui se formeraient lors du gâchage et leur permettre ainsi de jouer leur rôle granulaire.

Cependant, la majorité des études qui traitent la durabilité des BHP se concentrent sur l'effet des additions minérales. Les études réalisées sur l'effet des granulats soit naturels ou artificiels sont limitées. C'est dans cette optique que notre travail de recherche a été orienté.

Avant de valider objectivement la performance, il est nécessaire d'obtenir des bétons à hautes performances avec l'utilisation des différents granulats et additions. Une étude de l'influence de la nature minéralogique des granulats et des additions minérales sur le comportement physico mécanique des BHP sera présentée au chapitre III. Enfin, dans le chapitre IV nous présenterons une étude de la durabilité à savoir l'effet des granulats et des additions minérales.

Avant ces étapes, le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux d'étude et l'étude de formulation ajustée, et de voir l'effet des granulats et des additions minérales sur les principaux propriétés à l'état frais.

CHAPITRE II: MATÉRIAUX ET FORMULATION

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

II.1. Introduction

Nous présentons dans ce deuxième chapitre, qui est partagé en deux parties, les caractéristiques des matériaux utilisés et les compositions des bétons testés.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons investigué l'impact du facteur granulats et additions minérales sur le comportement des bétons à hautes performances de formulations semblables. Ainsi, nous avons porté notre choix sur un sable siliceux, trois sable obtenus par la réduction de trois types des granulats naturels (calcaire pur blanc, calcaire cristallin gris, calcaire marneux noir) et cinq types de gravillons de nature et d'origines différentes dont trois types sont des granulats naturels (calcaire pur blanc, calcaire cristallin gris, calcaire marneux noir) et les deux autres types sont des granulats artificiels (scorie et laitier cristallisé). Avant de mener l'étude expérimentale, il est indispensable de caractériser et d'identifier avec rigueur tous les constituants entrant dans la formulation des BHP d'études. Dans la première partie de ce chapitre en détail la campagne d'essais menée pour caractériser ces matériaux, à travers leurs propriétés morphologique (taille, forme et texture de surface), granulométrique, mécaniques (résistance en fragmentation), physiques (masse volumique, porosité et absorption d'eau) et enfin chimiques et minéralogiques. Les résultats de caractérisations obtenus et les analyses comparatives des différents granulats seront présentés.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous présenterons les méthodes de formulation utilisées, la procédure expérimentale de préparation et de conservation des différentes éprouvettes ainsi que les résultats de l'influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés des BHP à l'état frais.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Ciment

Le ciment que nous avons utilisé pour l'exécution de tous les travaux expérimentaux est un ciment Portland composé de classe *CEMII/A42.5* fabriqué par la cimenterie de Hadjar-Soud conforme à la norme européenne EN 197-1[EN 197-1 2012] et la norme Algérienne *NA 442/NA 442 2005*].

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies aux laboratoires de l'usine et de département de génie civil. Les différents résultats obtenus sont présentés aux tableaux II.1, II.2 et II.3.

Tableau II.1. Composition chimique du ciment CEM II/A42.5.

<i>Composition chimique du ciment</i>									
<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>SO₃</i>	<i>CL⁻</i>	<i>P.A.F</i>
60.24	23.25	5.69	3.36	0.74	0.45	0.27	1.94	0.006	1.67

Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment CEM II/A42.5.

<i>Composition minéralogique du ciment</i>		
<i>Éléments</i>	<i>Abréviation</i>	<i>Teneur (%)</i>
<i>Silicate tri calcique</i>	<i>C₃S</i>	58.5
<i>Silicate bi calcique</i>	<i>C₂S</i>	19.5
<i>Aluminate tricalcique</i>	<i>C₃A</i>	8.6
<i>Alummino-ferrite tetracalcique</i>	<i>C₄AF</i>	8.2

Tableau II.3. Propriétés physiques du ciment CEM II/A 42.5.

<i>Propriétés physiques du ciment</i>				
<i>Délais de prise</i>		<i>Consistance normale</i>	<i>Masse volumique (g/cm³)</i>	<i>Surface spécifique (BLAINE)(cm²/g)</i>
Début de prise	Fin de prise	26	3.1	3480
2h 30min	4h05min			

Tableau II.4. Résistance mécaniques du ciment CEM II/A 42.5.

<i>Résistance mécanique du ciment (MPa)</i>			
<i>Essais</i>	<i>Age</i>		
	<i>2 jours</i>	<i>7 jours</i>	<i>28 jours</i>
<i>Compression</i>	13.6	24.6	42.6
<i>Flexion</i>	2.59	4.81	6.60

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

II.2.2. Additions minérales

L'addition minérale est un constituant de base dans la formulation des BHP. Deux additions minérales ont été utilisées dans notre étude, il s'agit de la fumée de silice et du laitier granulé de haut fourneau. La fumée de silice utilisée est commercialisée par la société GRANITEXT.

II.2.2.1. Laitier granulé de haut fourneau

L'appellation de filler vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement à partir de sable de laitier granulé, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure II.1) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

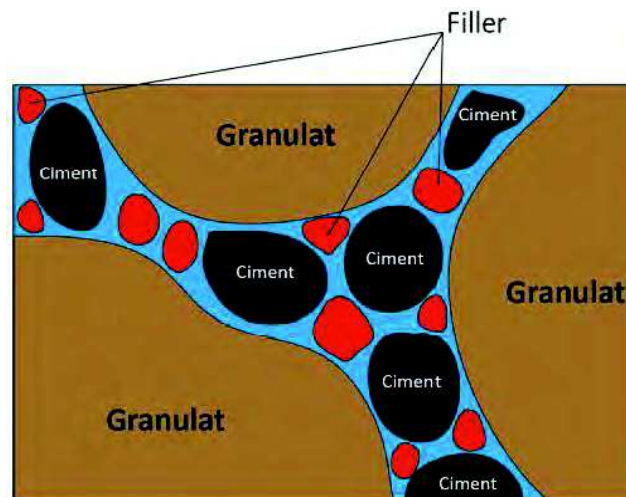


Figure II.1. Illustration de l'effet filler [DIE 2010].

Le laitier granulé utilisé dans cette étude est produit par le complexe sidérurgique d'El-Hadjar conforme à la norme NF EN 15167-1 [NFEN 15167-1 2006].

Le laitier granulé sous forme de filler, dont la finesse est supérieure à celle du ciment, est obtenu par broyage au laboratoire de Matériaux Géomatériaux et Environnement. Le broyeur à boulets utilisés est de capacité de 10kg.

La composition chimique et les propriétés physiques du laitier granulé sont données aux tableaux II.5. et II.6.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Tableau II.5. Composition chimique du laitier granulé.

<i>Composition chimique du laitier granulé</i>									
<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>SO₃</i>	<i>CL⁻</i>	<i>P.A.F</i>
40.69	38.90	8.17	4.15	4.56	0.89	0.10	0.36	0.01	-

Tableau II.6. Caractéristiques physiques du laitier granulé.

<i>Caractéristiques physiques du laitier granulé</i>		
<i>Masse volumique absolue (g/cm³)</i>	<i>Masse volumique apparente (g/cm³)</i>	<i>Surface spécifique (BLAINE) (cm²/g)</i>
2.88	1.22	3800

La figure II.2 illustre le diffractogrammes aux rayons X du laitier granulé qui est typique d'un matériau essentiellement vitreux. Le laitier granulé analysé présente de faibles quantités de phases cristallisées sous forme de calcite et de fer métallique.



Figure II.2. Filler de laitier granulé

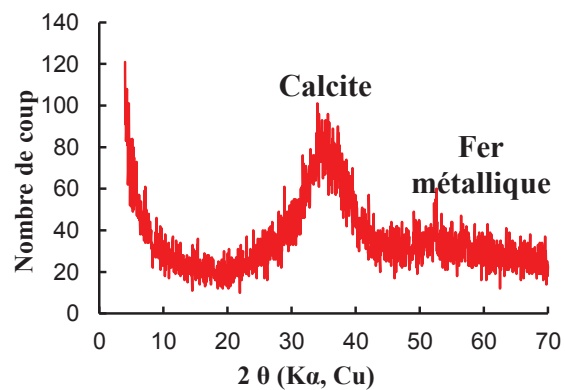


Figure II.3. Diffractogramme du laitier granulé

II.2.2.2. Fumée de silice

La fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse, la teneur en SiO₂ varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO₂

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

de la fumée de silice est élevée. La fabrication d'alliages de silicium comprenant des métaux non ferreux telle que le ferrochrome et le ferromanganèse conduit également à la formation de fumée de silice. Les particules de fumée de silice sont extrêmement fines, elles se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0.1\mu\text{m}$ et 1 ou $2\mu\text{m}$, de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen. Ces particules sont tellement fines que leur surface spécifique ne peut être déterminée en utilisant la méthode Blaine. Elle doit être déterminée par adsorption d'azote (*méthode BET*). Les valeurs typiques que l'on retrouve dans la documentation sont comprises entre 13000 et $25\ 000\ \text{m}^2/\text{kg}$

La fumée de silice utilisée dans les bétons hydrauliques conformément à la norme NF EN 13263-1 [NF EN 13263-1 2009]. Elle présente un matériau pouzzolanique qui joue un rôle très important durant le processus d'hydratation, l'évolution de la résistance mécanique et l'amélioration de la durabilité des bétons. La fumée de silice utilisée dans cette étude est fournie par la société algérienne GRANITEXT de dénomination commerciale MEDAPLAST HP, sous forme de poudre fine de couleur grise (Figure II.4).

La composition chimique et les propriétés physiques de la fumée de silice sont présentées aux tableaux II.7 et II.8.

Tableau II.7. Composition chimique de la fumée de silice.

Composition chimique de la fumée de silice									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃	CL	P.A.F
0.02	99.01	0.03	0.05	0.01	0.15	0.04	0.001	0.009	-

Tableau II.8. Caractéristiques physiques de la fumée de silice.

Caractéristiques physiques de la fumée de silice		
Masse volumique absolue (g/cm³)	Masse volumique apparente (g/cm³)	Surface spécifique (cm²/g)
2.24	0.5	5000

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

L'analyse aux rayons X par diffraction de la fumée de silice présentée par la figure II.4 montre un matériau essentiellement vitreux, contenant de faibles quantités de minéraux cristallisés sous forme de tridymite et de cristobalite.



Figure II.4. Fumée de silice

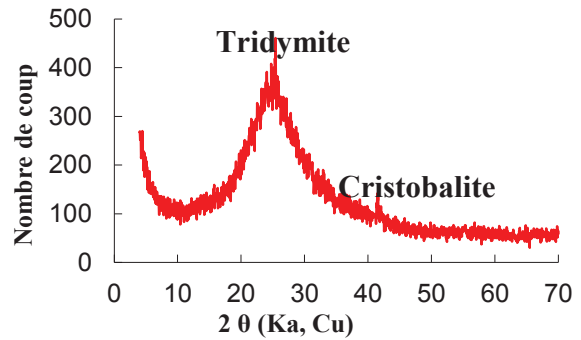


Figure II.5. Diffractogramme de la fumée de silice

II.2.3. Granulats

Dans le cadre de la formulation des bétons d'étude nous avons utilisé : un sable siliceux (S_1), trois sable obtenus par la réduction de trois types des granulats naturels (S_2) et cinq types de gravillons de nature et d'origines différentes dont trois types sont des granulats naturels (calcaire pur blanc, calcaire cristallin gris, calcaire marneux noir) et les deux autres types sont des granulats artificiels (scorie et laitier cristallisé).

Ces granulats seront nommés par la suite selon la terminologie introduite au tableau II.9.

Tableau II.9. Dénomination des granulats utilisés.

Types de granulats utilisés	Granulats naturels			Granulats artificiels	
	Calcaire pur blanc	Calcaire cristallin gris	Calcaire marneux noire	Laitier cristallisé	Scorie
forme	concassé	concassé	concassé	concassé	concassé
Dénomination	CP	CC	CM	LC	S

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

II.2.3.1. Identification des granulats

❖ Morphologie des granulats

L'observation à l'œil nu de la morphologie des différents granulats utilisés (Figure II.6) relève que l'ensemble des granulats utilisés sont des granulats concassés de forme plus au moins anguleuse variable d'un type à l'autre. La forme des granulats est caractérisée par les coefficients volumétriques et d'aplatissement. On peut observer aussi que les granulats naturels sont très compacts avec un minimum de pores par contre les granulats artificiels sont très poreux et de texture plus rugueuse.



Figure II.6. Morphologie des granulats d'étude.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

❖ Propriétés physiques et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés sont présentées dans le tableau II.10.

Tableau II.10. Propriétés physiques et mécaniques des granulats.

<i>Caractéristiques</i>	<i>MV_{ABS}</i> <i>(g /cm³)</i>	<i>Module de</i> <i> finesse</i>	<i>Coefficient</i> <i>d'absorption (%)</i>	<i>Equivalent</i> <i>de sable (%)</i>	<i>Los</i> <i>Angeles</i> <i>(%)</i>
Sable silicieux S ₁	2.60	2.19	-	70.5	-
Sable concassé S ₂ (CP)	2.69	3.5	-	65	-
Sable concassé S ₂ (CC)	2.65	3.25	-	62	-
Sable concassé S ₂ (CM)	2.60	3.20	-	61	-
Gravier Calcaire pur	2.69	-	0.66	-	22.78
Gravier Calcaire cristallin	2.65	-	0.68	-	24.50
Gravier Calcaire marneux	2.60	-	0.72	-	26.60
Gravier Laitier cristallisé	2.7	-	1.66	-	28.55
Gravier Scorie	3.8	-	1.69	-	13.5

D'après le tableau II.10 on peut conclure que:

- les masses volumiques des granulats naturels sont très proches. Les valeurs du coefficient d'absorption d'eau sont très faibles ce qui confirme la bonne compacité de ces granulats. Par contre les granulats artificiels présentent des densités assez élevées et des coefficients d'absorption plus élevés. Cela est dû essentiellement à leur nature minéralogique et morphologique qui se diffère de celle des granulats naturels.
- L'essai de los Angeles montre que les granulats de scorie sont mécaniquement plus résistants que les autres types de granulats.

❖ Analyse granulométriques

L'obtention d'un béton résistant, étanche et durable est l'objectif principal de tous les utilisateurs de béton. Afin d'atteindre cet objectif, les courbes d'analyse granulométrique sont utilisées pour

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

nous permettre d'acquérir la meilleure compacité dans un mélange de granulats. Sa connaissance permet d'établir avec précision le dosage en granulats de manière à optimiser le squelette granulaire et ainsi augmenter sa compacité selon les méthodes usuelles de formulation. L'analyse granulométrique permet également d'évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse, la continuité et la régularité de la granularité. L'essai de l'analyse granulométrique est effectué selon les normes [XP P18-545 2008], [NF EN 933-1 1997]. Il permet de déterminer les proportions massiques des passants cumulés, à travers les tamis de différents diamètres de maille, d'un échantillon de sable ou de gravillon. Les pourcentages de passant cumulé sont représentés sous la forme de courbes granulométriques dans les figures II.7, II.8, II.9, II.10 et II.11.

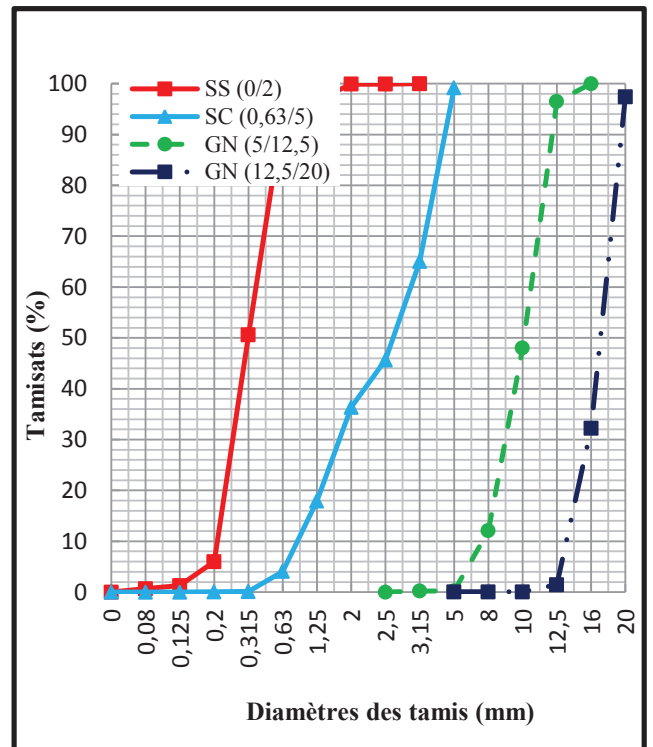
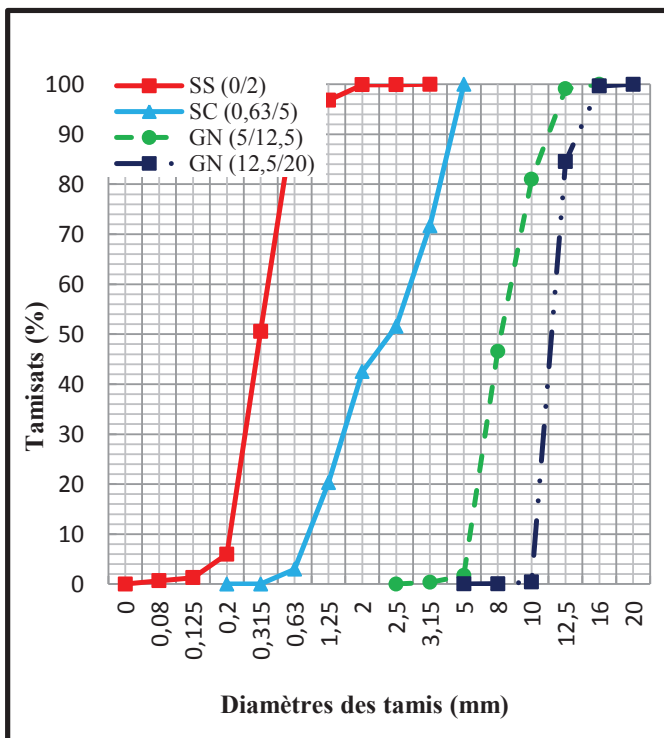


Figure II.7. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de calcaire pur blanc.

Figure II.8. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de calcaire cristallin gris.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

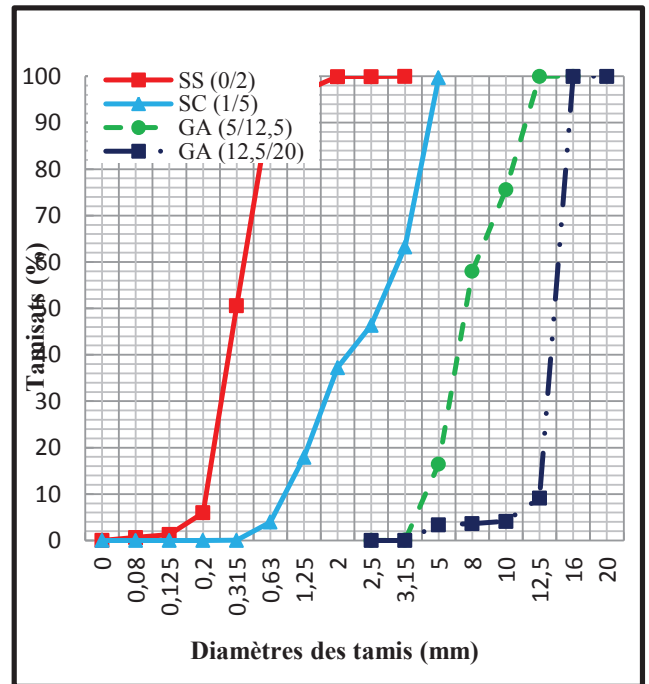
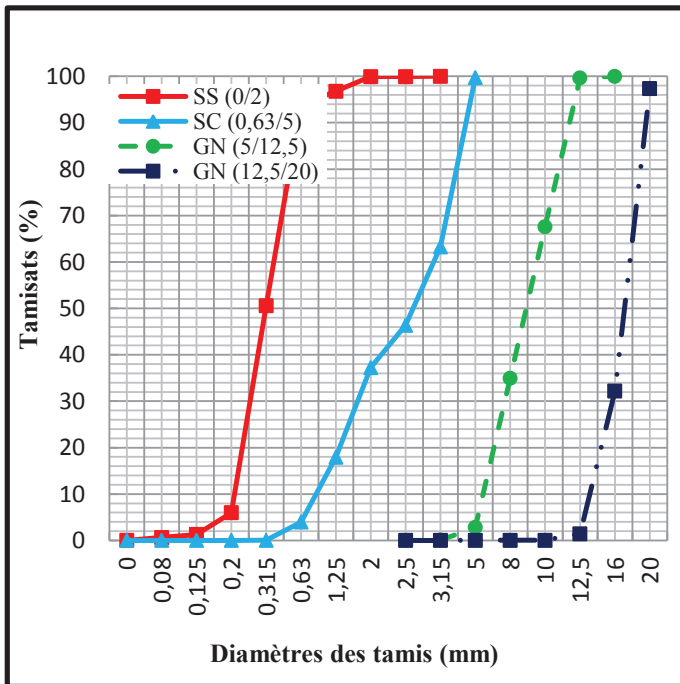


Figure II.9. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de calcaire marneux noire.

Figure II.10. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de laitier cristallisé.

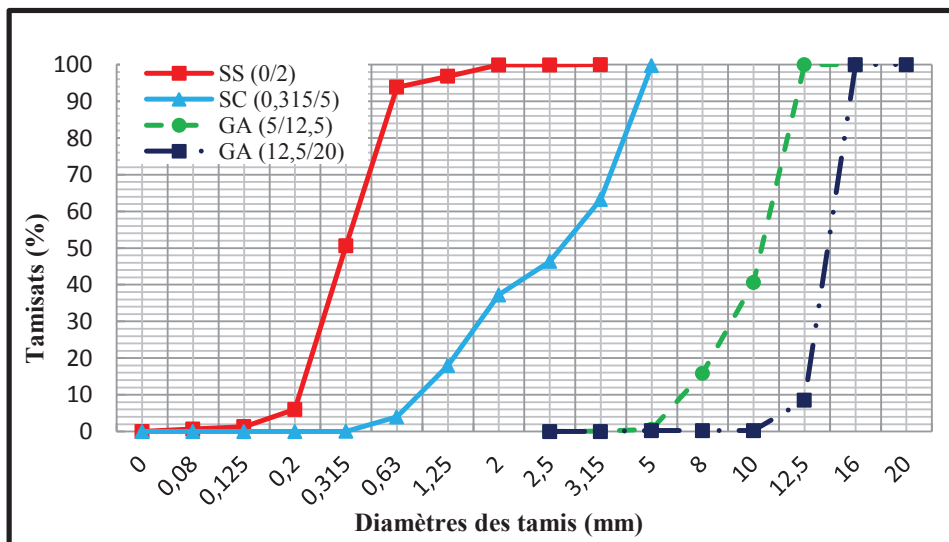


Figure II.11. Analyse granulométrique de sable silicieux et granulats de scorie.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Les résultats de l'analyse granulométriques apportent les renseignements suivants :

- Les gravillons des deux fractions (5/12,5 - 12,5/20) des différents granulats utilisés, que ce soit naturels ou artificiels, ont des distributions granulométriques relativement comparables.
- Les fractions granulaires utilisées dans cette étude donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

II.2.3.2. Propriétés chimiques et minéralogiques

Comme nous l'avons indiqué dans la bibliographie, la texture, la taille, la forme, les compositions chimiques et minéralogiques ont une incidence sur les propriétés mécaniques et physiques des granulats. La composition chimique et minéralogique des granulats a été déterminée respectivement par le biais d'une analyse chimique globale et d'une analyse diffractométrique aux rayons X (DRX). Pour effectuer ces analyses, les granulats sont finement broyés (taille des grains inférieure à 63 μm). Suite à ces analyses, nous essaierons de détecter l'influence de la nature minéralogique des granulats sur les propriétés mécaniques des BHP.

❖ Compositions chimiques

L'analyse chimique est effectuée sur un échantillon dont le volume est de l'ordre de quelques μm^3 . Les résultats sont présentés sous forme d'oxydes au tableau II.11.

Tableau II.11. Composition chimique des granulats.

Type de granulats	Composition chimique des granulats										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	<i>P.A.F</i>
Calcaire pur	0.40	0.11	0.06	55.91	0.18	0.04	0	0.05	-	-	42.3
Calcaire cristallin	0.30	0.44	0.29	53	1.6	-	0.3	0.1	-	-	42.9
Calcaire marneux	0.70	0.40	0.30	53.0	1.4	-	0.3	0.2	-	-	42.2
Scorie	3.9	1.6	36.6	46.2	11.8	-	-	-	-	-	-
Laitier cristallisé	40.26	8.98	2.98	40.89	3.40	0.59	0.6	0.01	-	-	-
Sable siliceux	93.88	2.13	1.60	0.43	0.12	0.39	0.38	0.24	0.03	0.13	0.67

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

- Les résultats traduisent la dominance de CaO dans les trois types granulats naturels de calcaire. Par contre les granulats de scorie sont distingués par une quantité élevée d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'oxyde de magnésium (MgO). Les granulats de laitier cristallisé sont marqués par le taux élevé d'oxyde de silice (SiO_2) et d'oxyde d'aluminium.

- Selon Lea [Lea 1971], le laitier cristallisé utilisé comme granulat de béton, doit respecter les deux conditions suivantes:

$$1. \text{CaO} + 0.8 \text{MgO} \leq 1.28 \text{SiO}_2 + 0.4 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1.75 \text{S.}$$

$$2. \text{CaO} \leq 0.9 \text{SiO}_2 + 0.6 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1.75 \text{S.}$$

Dans le cas de notre laitier cristallisé, La première condition donne l'inégalité ($43.61 < 56.15$) et la deuxième donne $40.89 < 42.65$, donc les deux conditions sont vérifiées.

❖ Compositions minéralogiques

Afin de définir avec précision la nature minéralogique des granulats, nous procédons à des mesures diffractométrique. La diffraction aux rayons X (DRX) est une méthode qui permet l'identification des phases cristallines d'un matériau. Elle permet aussi de réaliser des analyses quantitatives ou semi-quantitatives, en comparaison avec un échantillon étalon. Ces essais de diffraction ont été réalisés avec un diffractomètre de type Philips PW 3710 est munis d'une anticathode au *Cu* avec un filtre *Ni*, L'enregistrement pas à pas est réalisé entre 5 et $70^\circ 2\theta$ et ceci pour une durée de 1h30. Les diffractogrammes ont été obtenus à partir des matériaux préalablement broyés en poudre fine. L'analyse des phases par le DRX des granulats utilisés permet de connaître le degré de pureté ou détecter la présence d'élément argileux dans les granulats naturels.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

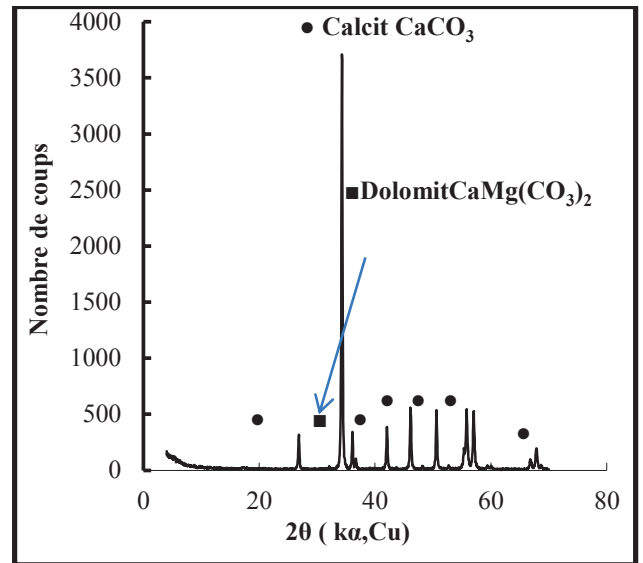
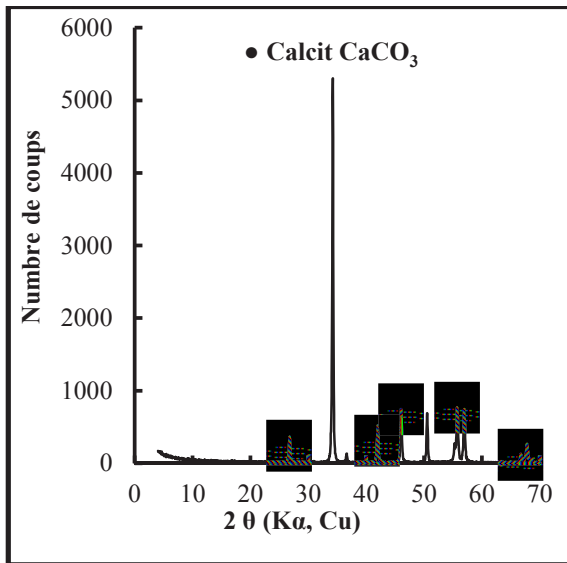


Figure II.12. Diagramme de diffraction X du Calcaire pur blanc.

Figure II.13. Diagramme de diffraction X du Calcaire cristallin gris.

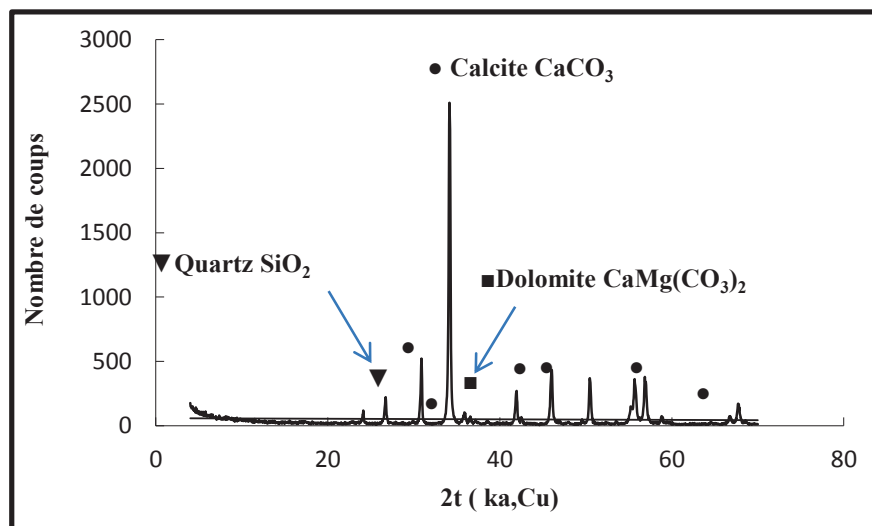


Figure II.14. Diagramme de diffraction X du Calcaire marneux noire.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

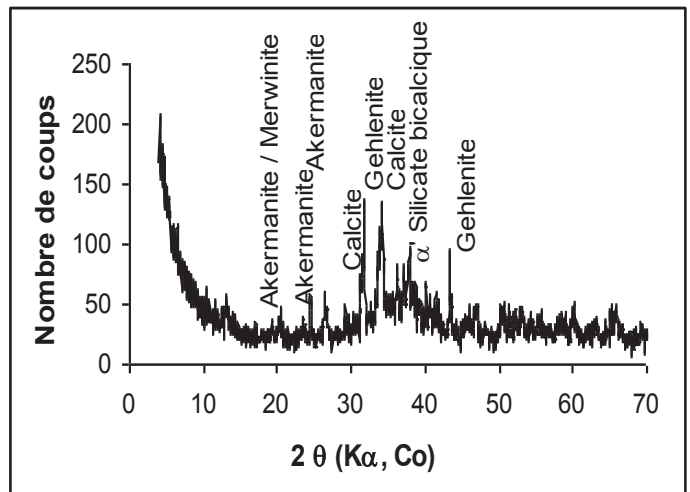
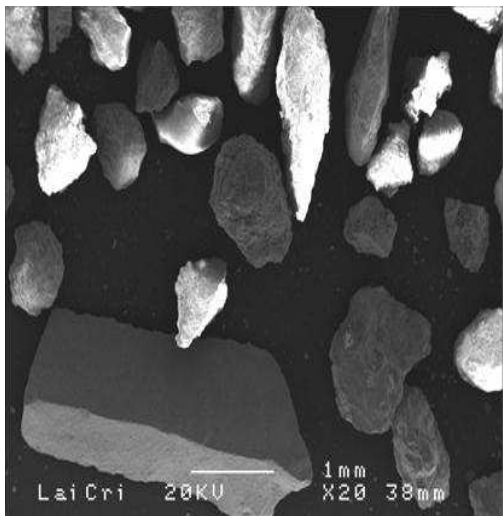


Figure II.15. Diagramme de diffraction X du Laitier cristallisé [Behim 2002].

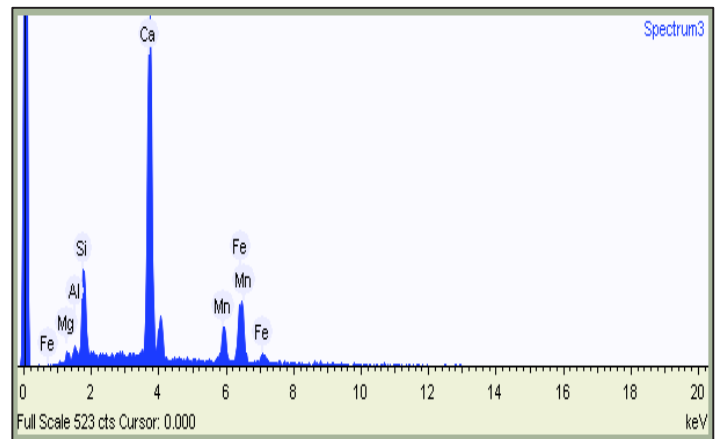
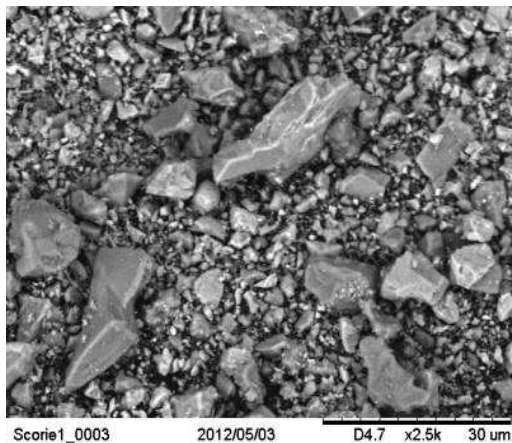


Figure II.16. Analyse MEB-EDS de la scorie.

- La DRX des granulats naturels montre que le calcaire pur blanc est constitué quasiment que de carbonate de calcium (figure II.12). Par contre on peut voir la présence de dolomite dans le calcaire cristallin de couleur grise (figure II.13) et la présence de dolomite et de quartz pour le calcaire marneux de couleur noire (figure II.14).
- Concernant le granulat de laitier cristallisé l'analyse au DRX montre que ce dernier est composé essentiellement de composants cristallisés de silicate de calcium ou de silico aluminates, qui ne présente aucune propriété hydraulique. Le composant principal est de la calcite. D'autres

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

minéraux tels que l'akermanite et la gehlenite peuvent être présents en faible quantité (figure II.15).

- Le MEB-EDS de la poudre de scorie montre que la scorie présente une nature hautement cristalline avec la détection de la présence d'oxydes de fer, d'oxyde d'aluminium ...etc (figure II.16).

II.2.3.3. Evaluation de l'expansion des granulats de scorie

Pour évaluer l'expansion des granulats de scorie, on a utilisé le test classique d'expansion en autoclave. Trois échantillons ont été soumis à une vapeur de 2,1 MPa et à 216°C pendant trois heures et la valeur de l'expansion a été calculée à partir de la moyenne des trois résultats du test. Seules les particules passant à travers le tamis 6,3 mm et retenus sur le tamis 5 mm sont utilisés pour le test de compactage. Le test de compactage a été utilisé pour préparer les échantillons selon la norme ASTM D698. Les agrégats ont été compactés en trois couches dans un moule de spécimen de 100 mm de diamètre et de 111 mm de hauteur comme il est présenté sur la Figure II.17.



Figure II.17. Moule de compactage pour l'essai de l'autoclave.

Un collier d'extension a été relié au moule pour permettre de placer un disque perforé avec tige et une surcharge sur le dessus d'un échantillon compacté. Le poids de disque plus la surcharge était de 1,5 kg. Le disque perforé permet à la vapeur de pénétrer dans l'échantillon. Le compactage a été effectué en utilisant une damme de 2,5 kg d'une hauteur de 30 cm pour

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

compacter les granulats de scorie en trois couches égales. Chaque couche recevait 25 coups répartis uniformément. Une règle a été utilisée pour couper l'excès de matière du moule afin d'assurer une hauteur d'échantillon initiale constante. Les granulats ont été séchés au four avant le compactage. La hauteur de la tige sur le dessus de l'échantillon a été mesurée en centimètres avant (h_i) et après (h_f) en autoclave en utilisant un micromètre fixé sur un support stationnaire. Cette hauteur a également été mesurée par rapport à un échantillon de référence de longueur constante avant (ref_i) et après (ref_f) l'échantillon à l'autoclave. Comme la montre l'équation (II.1), le pourcentage d'expansion (E) a été déterminé par rapport à la longueur (ou hauteur) initiale de l'échantillon, qui de l'ordre de 111 mm.

$$E = \frac{(h_f - ref_f) - (h_i - ref_i)}{G} 100\% \quad (\text{Eq: II.1})$$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau II.12.

Tableau II.12. Résultats du test de l'expansion des granulats de scorie.

Numéro de l'échantillon	Expansion (%)
1	5.3
2	5.7
3	5.4

- Les résultats obtenus confirment la présence d'une certaine quantité de chaux libre dans les granulats de scorie utilisées qui a provoqué une expansion moyenne de l'ordre de 5.45%. Cette expansion de la scorie algérienne est relativement inférieure à celle des scories usuelles mentionnées dans la littérature [George 2010] et [Alexander 2015]. Cela pourrait entraîner une expansion à long terme et endommager le béton.

II.2.4. Le superplastifiant

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un superplastifiant réducteur d'eau à base de copolymère acrylique et de dénomination commerciale Sika VISCOCRETE TEMPO12 conformément à la norme NF EN 934-2 NF[EN 934-2 2012]. Les données techniques de superplastifiant sont présentées au tableau II.13.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Tableau II.13. Caractéristiques techniques du superplastifiant.

<i>Caractéristiques techniques du superplastifiant</i>						
Dénomination	Densité	PH	Extrait sec	Teneur en ion Cl^-	Teneur en Na_2O éq.	Plage d'utilisation
VISCOCRETE TEMPO 12	1,06±0,01	6±1	30,2±1,3%	≤0,1%	≤1,0%	0,2 à 3%

II.2.5. 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 ville de Annaba.

II.3. Formulation des bétons d'étude

Après une caractérisation détaillée des différents constituants, nous présenterons dans cette partie la procédure et la méthode de formulation choisie pour déterminer la composition optimale des Bétons à Hautes Performances (BHP) de notre étude. Trois tests expérimentaux sont utilisés pour ajuster et corriger la maniabilité et la compacité des formulations choisies. Les résultats de ces tests seront exploités pour décrire l'effet de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés des BHP à l'état frais.

La recherche des bétons à hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à optimiser le squelette granulaire afin d'améliorer la compacité et de réduire au maximum la porosité. Plusieurs méthodes de formulation des bétons sont proposées dans la bibliographie. Nous utiliserons la méthode de l'université Sherbrooke ajustée pour la formulation des BHP d'étude. Les compositions optimisées s'appuient sur une même formulation de base afin de limiter les divergences en fixant le maximum de paramètres.

Deux approches de formulation sont utilisées pour optimiser la composition des BHP: la méthode de Dreux-Gorisse est utilisée pour déterminer les pourcentages des fractions granulaires et la méthode de l'université de Sherbrooke est utilisée pour déterminer le dosage de différents constituants.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

II.3.1. Optimisation du squelette granulaire

On recherche par cette méthode l'optimum du squelette granulaire pour minimiser au maximum la porosité intergranulaire. Cette méthode est basée sur l'obtention d'une courbe granulométrique continue permettant d'obtenir un squelette granulaire plus compact.

II.3.2. Formulation des BHP par la méthode de l'Université de Sherbrooke [Aïtcin 2001]

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton. Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure II.18 et le tableau II.14 présente la formulation des différents BHP.

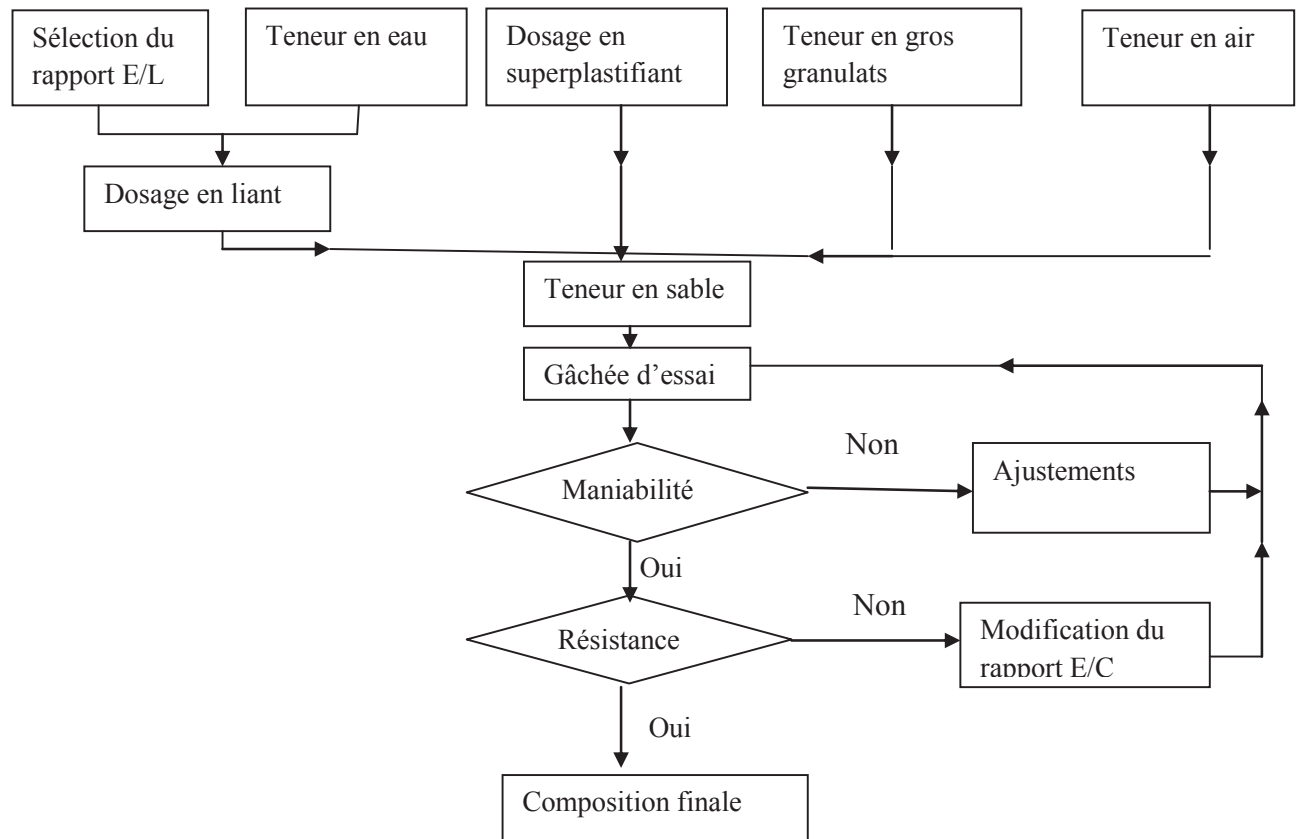


Figure II.18. Organigramme de formulation des BHP.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Tableau II.14. Formulation des différents BHP.

Matériaux	Dosage en kg/m ³									
	BHP avec filler de laitier granulé					BHP avec fumée de silice				
	BCC	BCP	BCM	BS	BLC	BCC	BCP	BCM	BS	BLC
Ciment	416	416	416	416	416	470	470	470	470	470
Sable silicieux	370	390	350	525	391	360	380	346	527	385
Sable concassé	371	390	351	530	390	370	390	345	528	390
Gravier (5/12.5)	430	416	344	430	415	430	416	344	430	415
Gravier(12.5/20)	620	634	706	620	635	620	634	706	620	635
Laitier granulé	104	104	104	104	104	-	-	-	-	-
Fume de silice	-	-	-	-	-	50	50	50	50	50
Superplastifiant	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
Eau	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145
E/L	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27

➤ Désignation des bétons utilisés

BCC: Béton à haute performance à base de granulat de calcaire cristallin.

BCP: Béton à haute performance de granulat de calcaire pur.

BCM: Béton à haute performance à base de granulat de calcaire marneux.

BS: Béton à haute performance à base de granulat de scorie.

BLC: Béton à haute performance à base de granulat de laitier cristallisé.

II.4. Confection et conservation des éprouvettes

Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 30 litres tout en respectant les références normatives [NF EN 12390-1 2001] et [NF EN 12390-2 2001]. La durée totale de malaxage est de 5min.

- Humidification de la bétonnière et le matériel utilisé pour l'essai de maniabilité,

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

- Introduction dans la cuve de la bétonnière des composants solides du plus grossier au plus fin : gravillon, sable, ciment et additions minérales,
- Malaxage à sec pendant 1 minute,
- Introduction d'une partie d'eau et malaxage pendant 1 minute30 secondes,
- Introduction de la partie d'eau qui reste mélangé avec le superplastifiant,
- Malaxage humide pendant 2 minutes,
- Vérification des propriétés d'ouvrabilité du BHP formulé à travers un test d'affaissement.

Le compactage est effectué sur une table vibrante pour une durée totale d'une minute. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et conservées sous l'eau.

II.5. Procédures de la détermination des propriétés du béton à l'état frais

Pour chaque gâchée et juste après le malaxage, on procède à la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams, de la masse volumique du béton frais et l'air occlus. La quantité de superplastifiant est ajustée afin de maintenir l'affaissement au cône d'Abrams entre 17 et 21 cm.

II.5.1 Masse volumique

Cet essai permet d'ajuster la formulation étudiée pour le même type de granulat en comparant le volume expérimental au volume théorique et de voir l'effet de la nature des granulats sur la variation la masse volumique. Pour effectuer cette mesure conformément à la réglementation en vigueur [NF EN 12350-6 2012], un récipient de volume connu est rempli entièrement de béton puis pesé. Le rapport entre la masse et le volume du béton donne la masse volumique du matériau à l'état frais comme il est indiqué dans la formule ci-dessous :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Où :

m_1 : masse du récipient vide en kg,

m_2 : masse du récipient rempli de béton en kg,

V : volume du récipient en m^3 .

La valeur de la masse volumique adoptée est la moyenne de trois valeurs.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Les résultats de la variation de la masse volumique des différents BHP à l'état frais en fonction de la nature des granulats et d'additions sont présentés au tableau II.15 et illustrés par la figure II.19.

Tableau II.15. Masses volumiques à l'état frais des BHP.

<i>Masses volumiques à l'état frais</i>										
	BHP avec filler de laitier granulé					BHP avec fumée de silice				
Béton	<i>BCC</i>	<i>BCP</i>	<i>BCM</i>	<i>BS</i>	<i>BLC</i>	<i>BCC</i>	<i>BCP</i>	<i>BCM</i>	<i>BS</i>	<i>BLC</i>
Masse volumiques (kg/m³)	2525	2530	2510	2850	2547	2490	2500	2470	2790	2500

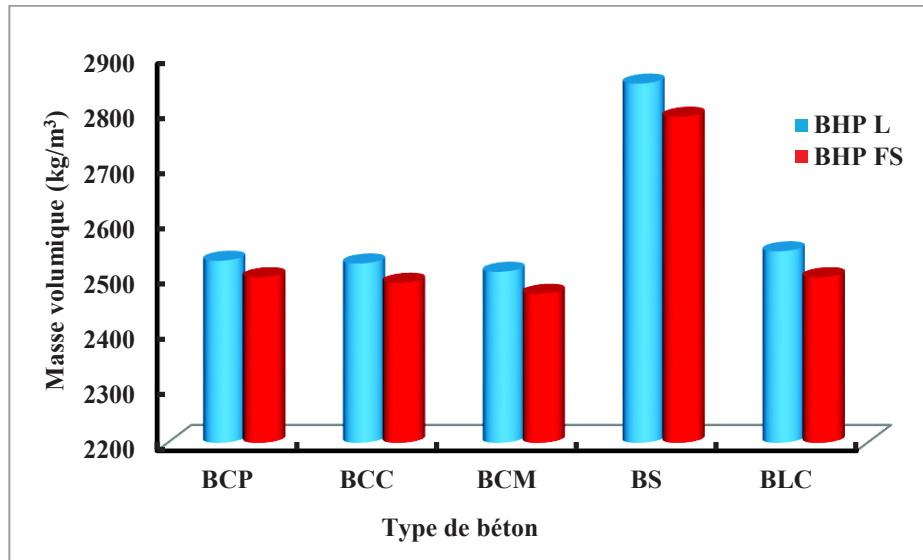


Figure II.19. Masse volumique à l'état frais des différents BHP.

D'après le tableau II.15 et la figure II.19 on remarque que :

- Pour le même type de granulat la masse volumique des BHP avec addition du laitier granulé est généralement supérieure à celle des BHP avec addition de fumée de silice. Cela est dû essentiellement à la différence des masses volumiques intrinsèques des deux additions minérales utilisées.
- Pour le même type d'addition minérale, la masse volumique à l'état frais des BHP est très influencée par la nature des granulats. Les BHP avec granulats de scorie présentent des masses volumiques supérieures à 2700 kg/m³ et qui sont largement supérieures à celles des

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

autres types de BHP d'étude. Ceci est dû essentiellement à la densité intrinsèque de granulat de scorie qui est de l'ordre de 3820 kg/m^3 .

II.5.2. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'ouvrabilité du béton présente une caractéristique essentielle dans la fabrication de béton. Dans notre cas l'ouvrabilité est caractérisée par l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams réalisé selon la norme [NF EN 12350-2 1999]. Il permet de déterminer la consistance d'un béton frais en mesurant l'affaissement qui n'est autre que la différence entre la hauteur du moule tronconique utilisé et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé.

Le cône utilisé est de dimensions (diamètre de la base de 200 mm, diamètre de la partie supérieure de 100 mm et de hauteur de 300 mm). Le cône doit être posé sur un plateau métallique horizontal légèrement humidifié au préalable. Le remplissage du cône se fait en trois couches de même hauteur, chaque couche étant piquée par 25 coups à l'aide d'une tige de piquage normalisée. Une fois rempli, le moule doit être retiré verticalement de façon régulière et effectuée en 5s à 10s. La hauteur de l'affaissement h est mesurée après stabilisation par l'intermédiaire d'une règle.

Les valeurs de mesure de l'affaissement au cône d'Abrams sont données au tableau II.16 et représenté par la figure II.20.

Tableau II.16. Valeurs de l'affaissement au cône d'Abrams des BHP d'étude.

Dénomination des BHP	BHP avec filler de laitier granulé					BHP avec fumée de silice				
	<i>BCP</i>	<i>BCC</i>	<i>BCM</i>	<i>BS</i>	<i>BLC</i>	<i>BCC</i>	<i>BCP</i>	<i>BCM</i>	<i>BS</i>	<i>BLC</i>
Affaissement (mm)	200	180	160	130	140	250	230	200	140	160

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

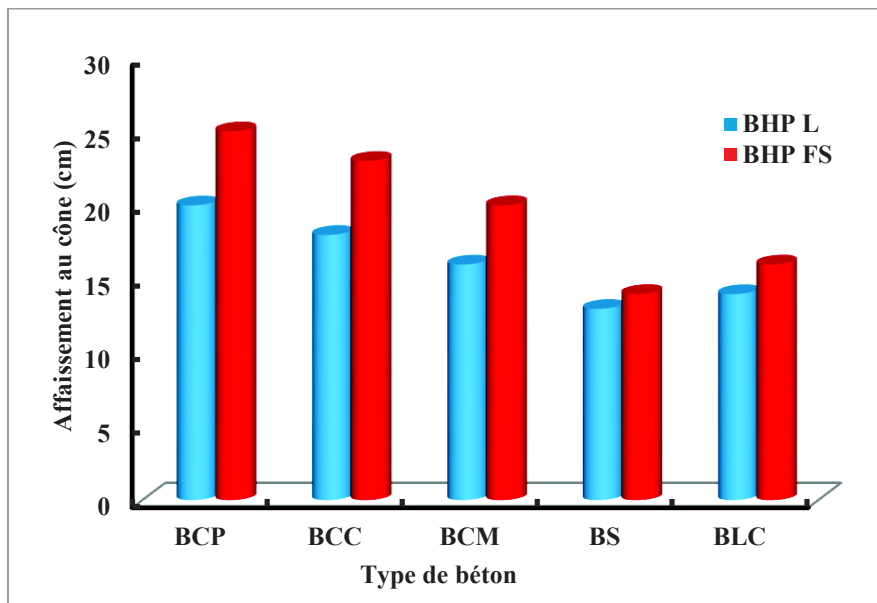


Figure II.20. Maniabilité des différents BHP (effet de la nature des granulats).

Selon les résultats obtenus on peut constater que :

- L'ensemble des mélanges des BHP présentent des bétons très plastiques ou fluides avec des valeurs d'affaissements aux alentours de 130 mm à 250 mm. Par leur nature poreuse et absorbante, les granulats de scorie et de laitier cristallisé affectent la maniabilité des BHP en comparaison avec celle des BHP avec granulats de calcaire plus compact et moins poreux.
- Les BHP à base de la fumée de silice sont légèrement plus maniable par rapport à ceux à base du laitier granulé. Cela est dû principalement à la morphologie sphériques des particules de la fumée de silice qui offre au BHP une certaine viscosité et un écoulement supérieur à celui des BHP à base de filler de laitier granulé qui présentent des formes plus au moins angulaires et une microporosité plus élevée. Cela confirme les résultats trouvés par [Newman 2003] et [Khan 2014].

II.5.3. Mesure de la teneur en air occlus

L'essai à l'aéromètre a été réalisé sur les BHP selon la norme NF EN 12350-7 [NF EN 12350-7 2012]. Cet essai est basé sur le principe de la compressibilité et présume que l'air occlus dans le béton est le seul élément à être comprimé. Moins le béton contient d'air occlus et plus ses performances mécaniques et sa durabilité sont élevées. Expérimentalement, la teneur en air est réalisée par la méthode du manomètre avec un aéromètre à béton présenté à la Figure II.21.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE



Figure II.21. Dispositif de mesure de la teneur en air occlus.

Après l'arrêt du malaxage, un échantillon de BHP d'un volume de 8 litres est versé dans le récipient de l'appareil. Il est constitué de deux éléments, une cuve recevant l'échantillon de béton et un couvercle rigide muni d'un cadran gradué. L'ensemble couvercle-cuve est fixé par un mécanisme étanche et le tout est rempli d'eau. Une pression est ensuite appliquée sur l'échantillon en utilisant une pompe à air intégré au dispositif et installée en partie supérieure du couvercle. Cette pression provoque une baisse du niveau d'eau proportionnelle à la diminution des vides d'air. La valeur lue sur le manomètre du cadran correspond au pourcentage apparent d'air.

Les valeurs de mesures de l'air occlus sont données au tableau II.17 et représentées par la figure II.22.

Tableau II.17. Mesure de l'air occlus des BHP d'étude.

Dénomination des BHP	BHP avec fumée de silice					BHP avec filler de laitier granulé				
	<i>BCC</i>	<i>BCP</i>	<i>BCM</i>	<i>BS</i>	<i>BLC</i>	<i>BCC</i>	<i>BCP</i>	<i>BCM</i>	<i>BS</i>	<i>BLC</i>
Air occlus (%)	1.7	1.6	1.7	2.6	1.9	1.9	1.8	1.9	2.9	2.1

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

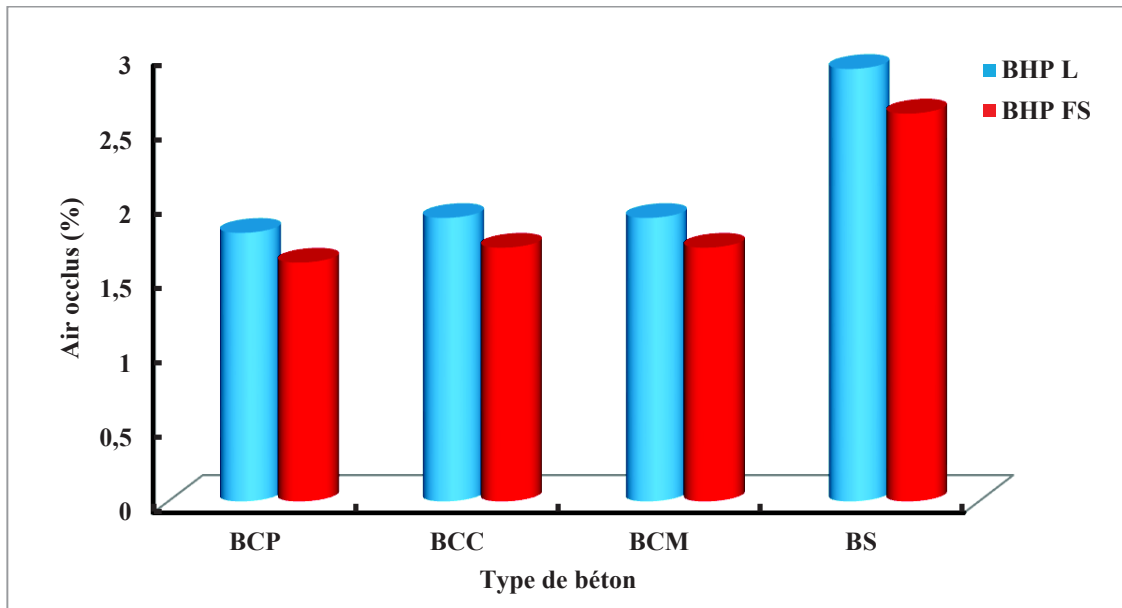


Figure II.22. Variation de l'air occlus des BHP en fonction de la nature des granulats et d'additions.

D'après la figure 22 on peut conclure que :

- La nature des granulats influence le volume de l'air occlus. La surface poreuse de scorie et de laitier cristallisé affecte légèrement l'air occlus des BHP.

II.6. Conclusion

Cette étude nous a permis de mener une caractérisation physico-chimique des différents matériaux utilisés, de choisir les méthodes de formulation appropriées et de voir l'influence de la nature minéralogique des granulats et des additions minérales sur les propriétés du béton à l'état frais. A l'issue de cette première étude les constatations suivantes peuvent être dégagées:

- D'après les résultats de la caractérisation des constituants entrant dans la formulation des BHP d'étude, on peut conclure que les matériaux utilisés répondent aux exigences normatives.

- La DRX montre la dominance de CaO dans les trois granulats naturels, les masses volumiques absolues de ces trois types de granulats sont très proches.

- La DRX des granulats de scorie montre la présence d'une quantité élevée d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'oxyde de magnésium (MgO) et la présence d'oxyde de silice (SiO_2) et d'oxyde

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

d'aluminium dans les granulats de laitier cristallisé, ces granulats artificiels sont plus poreux et moins compact.

- La méthode de formulation choisie est une combinaison de deux approches de formulation.
- La masse volumique à l'état frais des BHP avec addition du laitier granulé est généralement supérieure à celle des BHP avec addition de fumée de silice.
- La masse volumique à l'état frais des BHP est très influencée par la nature des granulats. Les BHP avec granulats de scorie présentent des masses volumiques largement supérieures à celles des autres types de BHP d'étude.
- La maniabilité des BHP est très affectée par la nature minéralogique des granulats et des additions minérales.
- La nature des granulats et des additions minérales influence le volume de l'air occlus des BHP.

Le chapitre suivant sera consacré à une caractérisation approfondie de l'influence des différents types de granulats et d'additions minérales sur les propriétés physiques et le comportement mécanique des BHP.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

CHAPITRE III : COMPORTEMENT PHYSICO-MÉCANIQUE DES BHP

III.1. Introduction

La synthèse bibliographique présentée dans le premier chapitre a mis en exergue le rôle et l'impact du paramètre granulats et additions minérales au niveau de la formulation et le comportement mécanique des BHP. Dans ce chapitre, nous présenterons les corrélations possibles entre la nature minéralogique des granulats et les propriétés physico-mécaniques et microstructurales. Pour établir ces corrélations un programme expérimental a été réalisé. Dix mélanges de bétons à hautes performances ont été préparés avec cinq types de granulats et deux types d'additions minérales de nature différente. L'ensemble de formulations de ce programme sont présentées dans le chapitre II. Ces BHP se caractérisent par un rapport E/L constant. On se propose dans ce chapitre d'étudier la variation de la masse volumique à l'état durcis, la résistance mécanique en compression et en traction par flexion et la microstructure des bétons d'études.

III.2. Essais physico-mécaniques

III.2.1. Masse Volumique

La masse volumique du béton à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7 [NF EN 12390-7, 2011]. Les éprouvettes utilisées sont de forme cubiques de dimensions (10×10×10) cm.

III.2.2. Essai de compression

La résistance mécanique en compression est le repère principal pour toute caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons. Ce paragraphe présente une description détaillée de la procédure de détermination de la résistance mécanique en compression.

Les éprouvettes utilisées sont de forme cubique de dimensions (100×100×100)mm³ confectionnées conformément à la norme NF EN 12390-3 [NF EN 12390-3 2012]. Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes sont conservées en humidité saturante jusqu'aux échéances des essais (7, 28, 90 et 360 jours). Pour chaque type de béton et à chaque échéance d'essai, la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes.

Le test de compression a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN asservie en force avec une vitesse de chargement de $2,4 \pm 0,2$ kN/Sec (Figure III.1).

La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à " j" jours $f_{c,j}$ est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (voir l'équation. III.1) :

$$f_{cj} = P/S \text{ (MPa)} \quad (\text{Eq. III.1})$$

Où

P : charge de rupture en N.

S : section transversale de l'éprouvette en mm².



Figure III.1. Description de l'essai de compression (LMGE Université de Annaba).

III.2.3. Essais de traction par flexion

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 (h_xh) et de portée (L) à une charge concentrée appliquée au milieu (P), on utilise l'essai de flexion à quatre points (deux charges appliquées symétriquement) qui offre l'avantage de présenter toute une zone de moment maximal constant.

Pour chaque mélange de béton, trois éprouvettes prismatiques de dimensions (100x100x400) mm³ ont été utilisées pour les tests de traction par flexion en trois points.

Les paramètres déterminés sont la résistance en traction par flexion ainsi que les courbes « charge-flèche ».

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

Le test de traction par flexion a été effectué à l'aide d'une machine de capacité 50kN (figure III.2).

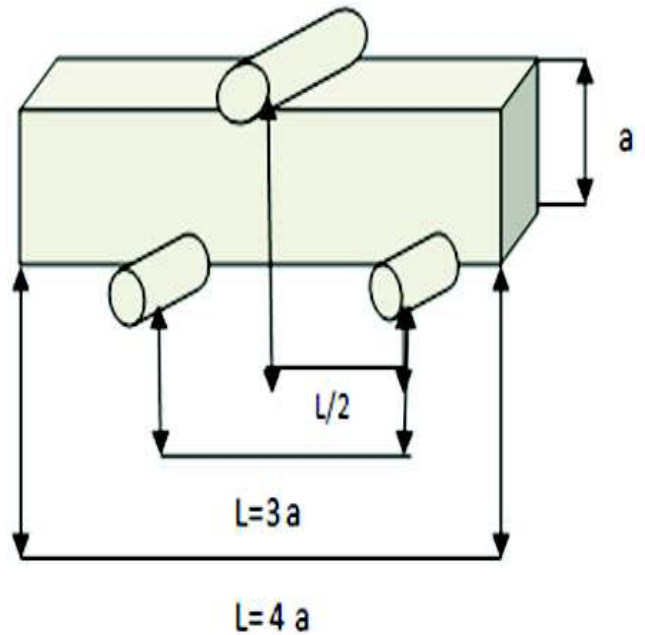


Figure III.2. Description de l'essai de traction par flexion (LMGE Université de Annaba).

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Masse volumique à l'état durci

La variation de la masse volumique des BHP à l'état durci en fonction de différents paramètres de formulation à savoir la nature des granulats et le type de l'addition minérale utilisés est illustrée par les figures III.3 et III.4.

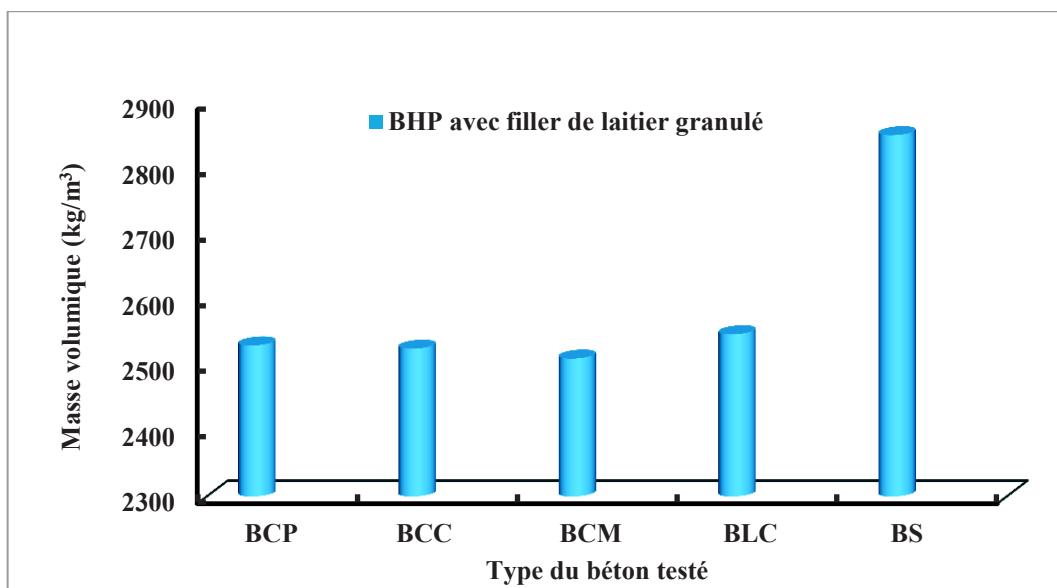


Figure III.3. Masse volumique des BHP avec filler de laitier granulé.

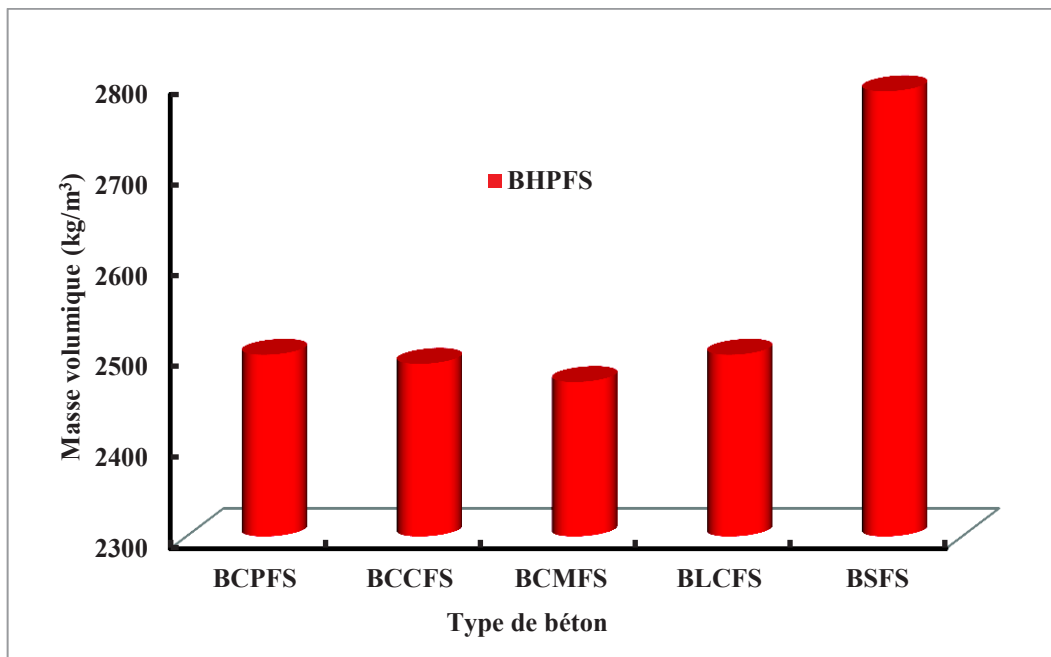


Figure III.4. Masse volumique des BHP avec fumée de silice.

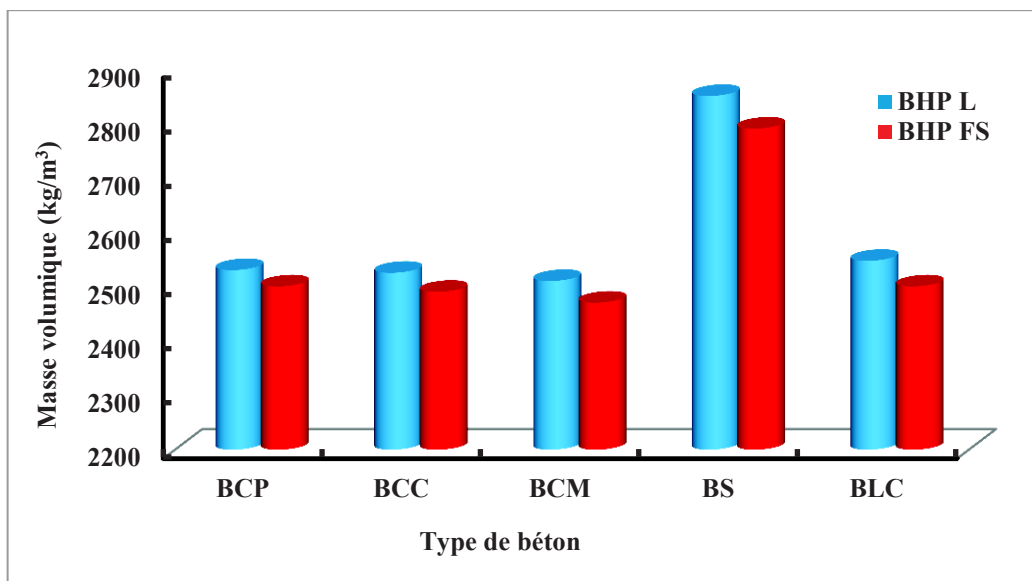


Figure III.5. Masse volumique des BHP (effet des additions minérales).

D'après les figures III.3, III.4 et III.5 qui montrent l'effet de la nature des granulats et des additions minérales sur la masse volumique des BHP à l'état durci, on peut constater que :

- Pour les formulations avec le même type de granulat, la masse volumique des BHP avec filler de laitier est légèrement supérieure à celle des BHP avec fumée de silice. Cela est dû essentiellement à la différence de densité intrinsèque de deux additions minérales utilisées.
- Les résultats montrent aussi que la nature des granulats influence de façon significative la masse volumique des BHP. Deux cas sont à signaler : le premier cas concerne l'effet de la

nature minéralogique de trois granulats naturels à savoir le calcaire pure blanc, calcaire cristallin gris et calcaire marneux noire. Les BHP avec granulats de calcaire pur blanc présentent la masse volumique la plus élevée par rapport à celle des BHP avec granulats de calcaire cristallin et calcaire marneux. Le deuxième cas concerne l'influence de l'introduction des granulats artificiels en substitution aux granulats naturels, on peut constater que les masses volumiques des BHP avec granulats de scorie ou de laitier granulé sont nettement supérieures à celle des BHP avec granulats naturels. Cela est dû à la densité la plus élevée des granulats artificiels.

III.3.2. Résistance mécanique en compression

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions des BHP étudiées dans cette étude.

Le rapport Eau/Ciment qui gouverne la résistance du béton ordinaire en compression simple n'est plus le seul paramètre qui influence la résistance des bétons à hautes performances. Cette dernière est caractérisée par l'empilement granulaire constitutif, par l'effet des additions minérales et la nature des granulats utilisés. Les essais de compression ont été effectués dans le but de mettre en évidence l'effet de deux paramètres à savoir : la nature des granulats et des additions minérales sur la résistance mécanique en compression. Afin d'étudier l'effet de ces deux paramètres, cinq types de granulats naturels et artificiels et deux types d'additions minérales à savoir la fumée de silice et filler de laitier.

Les résultats de résistance en compression à 360 jours de durcissement ainsi que leurs résistances moyennes, leurs écarts types et leurs coefficients de variation sont présentés aux tableaux III.1 et III.2.

Les résultats des essais de compression à 360 jours de durcissement qui sont donnés dans les tableaux III.1 et III.2 montrent que le coefficient de variation est faible pour l'ensemble des éprouvettes testées. Ce coefficient varie dans l'intervalle de 0,16% à 5%, ce qui signifie que les éprouvettes préparées sont plus homogènes.

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

Tableau III.1. Résistance en compression des BHP avec fumée de silice.

Éprouvette	Résistance en compression à 360 jours (MPa)	Résistance moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
BHPS-1	92	86.8	4.72	5.43
BHPS-2	82.8			
BHPS-3	85.6			
BHPLC-1	78.7	78.57	1.50	1.91
BHPLC-2	80			
BHPLC-3	77			
BHPCP-1	67.76	67.52	0.54	0.80
BHPCP-2	66.9			
BHPCP-3	67.9			
BHPCC-1	63.69	62.80	0.92	1.46
BHPCC-2	61.86			
BHPCC-3	62.86			
BHPCM-1	62	61.54	0.54	0.87
BHPCM-2	60.95			
BHPCM-3	61.67			

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

Tableau III.2. Résistance en compression des BHP avec filler de laitier granulé.

Éprouvette	Résistance en compression à 360 jours (MPa)	Résistance moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
BHPS-1	73.9	74.49	0.51	0.69
BHPS-2	74.78			
BHPS-3	74.8			
BHPLC-1	70.2	70.5	0.70	0.99
BHPLC-2	71.3			
BHPLC-3	77			
BHPCP-1	70	62.1	0.10	0.16
BHPCP-2	62.2			
BHPCP-3	62			
BHPCC-1	60.95	60.8	0.30	0.50
BHPCC-2	60.45			
BHPCC-3	61			
BHPCM-1	60	60.15	0.26	0.43
BHPCM-2	60.45			
BHPCM-3	60			

III.3.1.1. Effet de la nature des granulats

L'objectif initial de cette étude était de confectionner des BHP de résistance équivalente et avec un rapport E/L constants. Le but est d'étudier et d'éclaircir l'influence du paramètre granulat sur l'évolution des résistances mécaniques dans le temps.

Les figures III.6 et III.7, représentent les résultats de l'évolution de la résistance en compression de deux séries de BHP formulés avec trois types de granulats naturels. La fumée de silice est utilisée comme addition minérale pour la première série et le laitier granulé est choisi comme addition minérale pour la deuxième série.

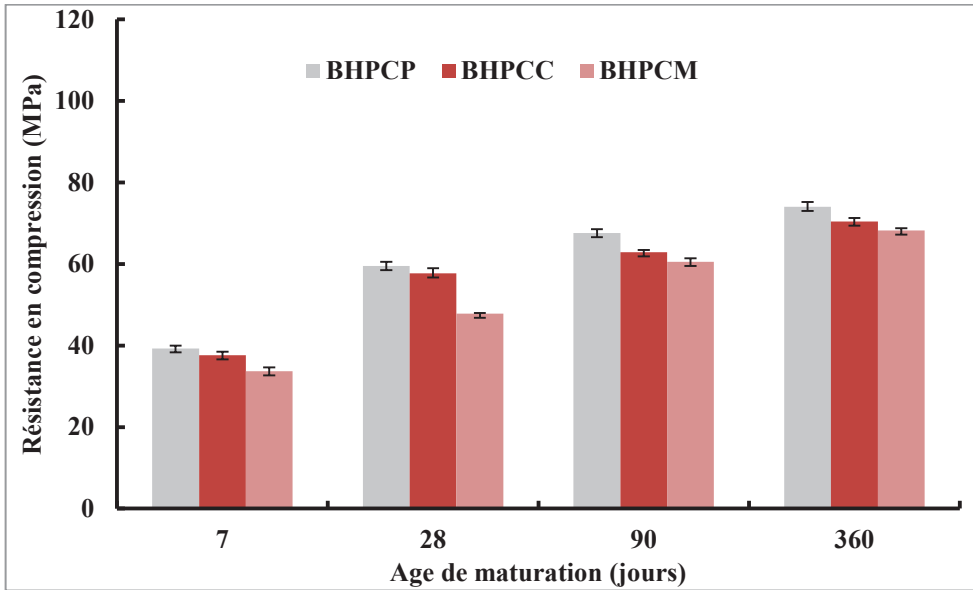


Figure III.6. Résistance en compression des BHP avec fumée de silice (effet de la nature des granulats naturels)

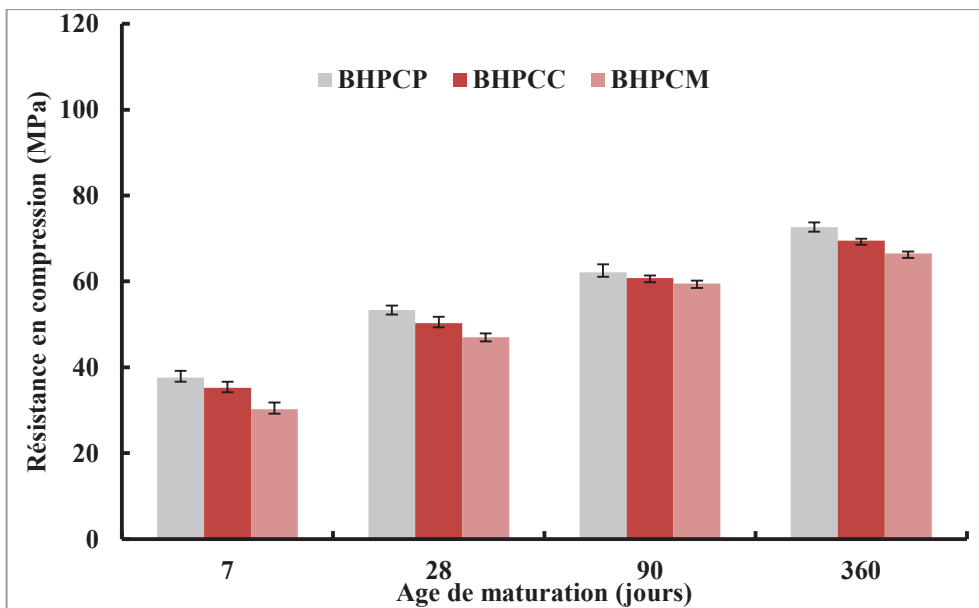


Figure III.7. Résistance en compression des BHP avec filler de laitier granulé (effet de la nature des granulats naturels).

Concernant les granulats naturels, les histogrammes des figures III.6 et III.7, qui représentent l'influence de la nature minéralogique de trois granulats naturels, montrent une dispersion certaine au niveau des résistances en compression et des valeurs de l'écart type.

- Dès 7 jours, on observe des niveaux des résistances variables selon le type de granulat utilisé. Les valeurs de résistance en compression des BHP avec fumée de silice sont de l'ordre de 39,4 MPa dans le cas d'utilisation de granulats de calcaire pur blanc et 33,7 MPa dans le cas d'utilisation de granulats de calcaire marneux noir.

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

- Selon les valeurs de l'évolution des résistances de 7 à 365 jours, les BHP à base de granulats de calcaire pur blanc présentent les meilleures résistances en compression par rapport à celles des BHP à base de granulats de calcaire cristallin gris ou calcaire marneux noire. Cela est attribué aux caractéristiques minéralogiques, morphologiques et mécaniques des trois types de granulats de calcaire utilisés. Le calcaire pur blanc est le granulat dont la minéralogie est la plus distincte des autres granulats. Selon la littérature [Gaweska 2004] et [Mekani 2011] ce type de granulats est constitué quasiment de carbonates et sa minéralogie est caractérisée par un excellent comportement mécanique lorsque leur porosité est faible. Certains auteurs avancent la notion d'épitaixie entre la calcite et la pâte de ciment. Cette liaison est plus forte qu'un simple collage. L'obtention d'une résistance en compression élevée du béton ne semble donc pas uniquement assujettie à celle du granulat utilisé. La qualité de l'interface granulat/matrice cimentaire pourrait jouer aussi un rôle.

- Les gains des résistances en compression des BHP à base de granulats de calcaire pur blanc sont respectivement de l'ordre de 13% - 24% à 28 jours et de 9% à 365 jours par rapport à ceux des BHP à base de granulats de calcaire marneux noire pour les deux types de fillers.

La comparaison de l'évolution des résistances en compression des BHP à base de granulats artificiels (scorie et laitier cristallisé) à celle des BHP à base de granulats naturels de calcaires, sont représentées par les figures III.8 et III.9.

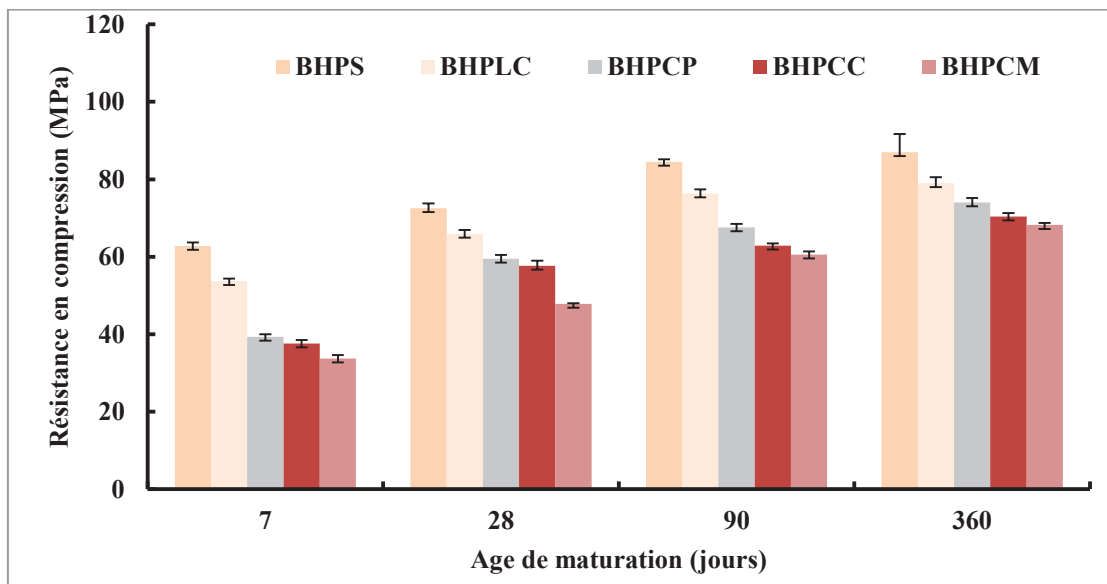


Figure III.8. Résistance en compression des BHP avec fumée de silice (effet de la nature des granulats artificiels et naturels).

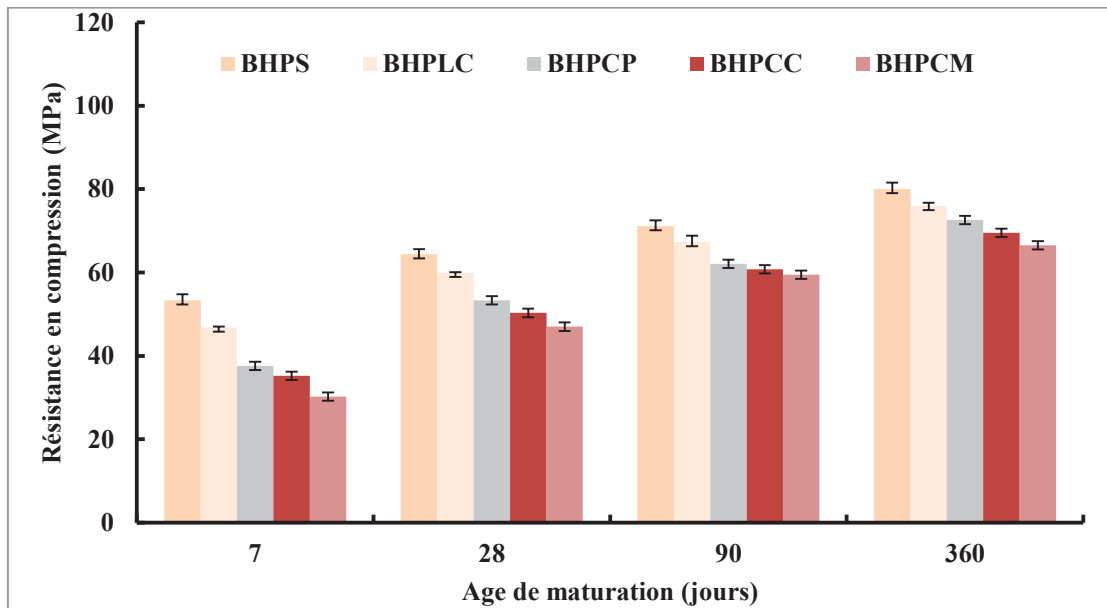


Figure III.9. Résistance en compression des BHP avec filler de laitier granulé (effet de la nature des granulats artificiels et naturels).

On peut remarquer au niveau de ces figures que :

- Les résistances mécaniques en compression, à différentes échéances, des BHP à base de granulats artificiels sont plus élevées que celles des BHP avec granulats naturels. Cela s'explique d'une part par la forte résistance et les bonnes caractéristiques mécaniques de ces types de granulats artificiels et d'autre part de leur morphologie qui assure une intime adhérence granulat-pâte.
- Les gains de résistances en compression des BHP obtenus suite à la substitution des granulats naturels par les granulats artificiels de scorie sont respectivement de l'ordre de 20% - 22% à 28 jours et de l'ordre de 10% - 17% à 360 jours pour les deux types d'additions.
- Les gains de résistances en compression des BHP obtenus avec les granulats de laitier cristallisé sont respectivement de l'ordre de 11% - 12% à 28 jours et 5% - 7% à 360 jours.

III.3.1.2. Effet des additions minérales

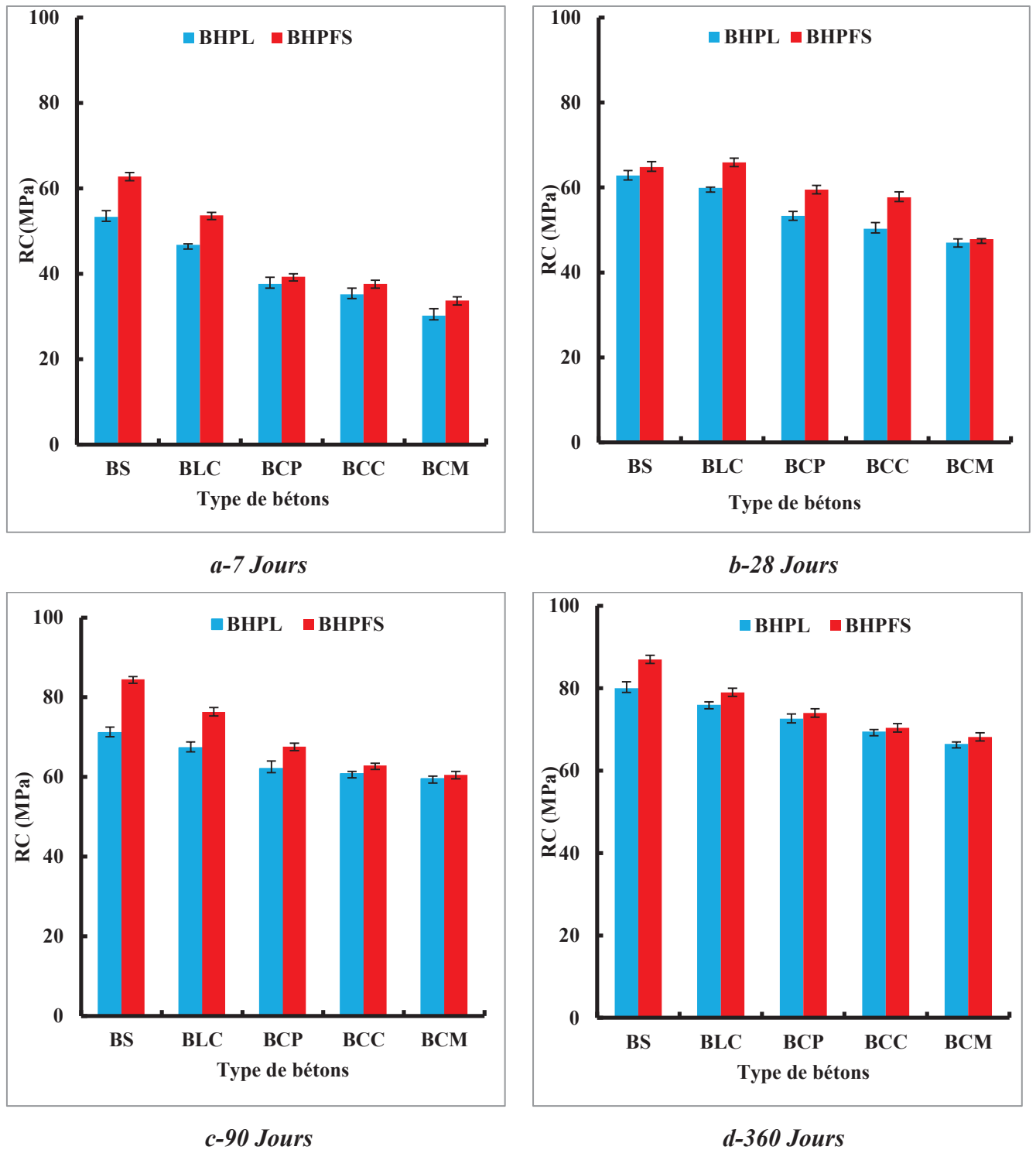


Figure III.10. Effet des additions minérales sur la résistance en compression des BHP.

La figure III.10 montre que les résistances en compression des BHP augmentent avec le temps, dû à l'hydratation du ciment et de l'accumulation de produits d'hydratation qui comble certains des espaces interstitiels disponibles dans la matrice cimentaire de béton, résultant une amélioration des performances mécaniques. Le taux de développement de la résistance dans les BHP dépend de l'activité pouzzolanique ou hydraulique des additions minérales. L'incorporation d'addition minérale modifiée la cinétique (vitesse, chaleur et formation des hydrates) de durcissement. Cette modification dépend de la nature de l'addition (activité, minéralogie, morphologie et granulométrie).

On observe selon les résultats illustrés par les figures III.10 a, b, c et d, que dès 7 jours, la cinétique de durcissement des BHP avec fumée de silice est plus rapide que celle des BHP avec filler de laitier granulé. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fumée de silice est une addition à caractère très pouzzolanique qui accélère les résistances mécaniques et grâce à sa finesse plus élevée, l'interface pâte-granulats devient plus dense et plus résistant. A l'inverse, le laitier granulé présente une activité hydraulique plus moins lente et une finesse inférieure à celle de fumée de silice ceci influence la cinétique et le processus d'hydratation surtout à court terme. Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Ko^o ksal et al [Ko^o ksal 2008] et Rafat [Rafat 2011]. En plus la différence du processus d'hydratation des deux additions minérales. L'hydratation en présence de la fumée de silice peut être divisée en deux phases: la première est caractérisée par une hydratation rapide accompagnée d'une dissolution et consommation des particules de la fumée de silice et un accroissement des résistances mécaniques. La seconde est caractérisée par une évolution faible de l'hydratation mais le système devient plus dense à cause du réarrangement des produits d'hydratation et la conversion des grands pores en pores fins résultant de la réaction pouzzolanique, qui joue un rôle important vis-à-vis de l'accroissement des résistances.

Contrairement le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour développer une cinétique d'hydratation satisfaisante d'un agent d'addition appelé activant (dans notre cas c'est le ciment). Le processus d'hydratation est relativement lent et peut être vu comme une répétition de cycles dissolution-concentration-précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à hydratation maximum des grains de laitier. Les grains de laitiers étant plus lisses que les grains de clinker. Les hydrates ont plus de mal à se développer sur ces grains et le développement des résistances mécaniques se trouve plus lent pour les mélange ciment- laitier par rapport au mélange ciment- fumée de silice.

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

II.3.2. Résistance en traction par flexion

L'essai de flexion trois points a été effectué sur des éprouvettes prismatiques. Les résultats des essais de traction par flexion des différents bétons étudiés sont récapitulés dans les tableaux III.3 et III.4.

Tableau III.3. Résistance en traction par flexion à 28jours des BHP avec fumée de silice.

Éprouvette	Charge maximal (kN)	Charge moyenne (KN)	Ecart type (KN)	Résistance en traction par flexion (MPa)
BHPS-1	15			
BHPS-2	13	13.5	1.3	7.1
BHPS-3	12.5			
BHPLC-1	10.5			
BHPLC-2	8.7	10.07	1.2	6.0
BHPLC-3	11			
BHPCP-1	8.5			
BHPCP-2	9	9	0.5	5.0
BHPCP-3	9.5			
BHPCC-1	9.2			
BHPCC-2	8.2	8.5	0.6	4.5
BHPCC-3	8			
BHPCM-1	7			
BHPCM-2	07.5	7.5	0.5	4.0
BHPCM-3	08			

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

Tableau III.4. Résistance en traction par flexion à 28 jours des BHP avec filler de laitier.

Éprouvette	Charge maximal (kN)	Charge moyenne (KN)	Ecart type (KN)	Résistance en traction par flexion (MPa)
BHPS-1	11.6	12.5	0.8	6.50
BHPS-2	13			
BHPS-3	12.8			
BHPLC-1	10.5	9.5	0.8	5.0
BHPLC-2	9.2			
BHPLC-3	9			
BHPCP-1	7.2	8.5	1.1	4.5
BHPCP-2	9			
BHPCP-3	9.3			
BHPCC-1	7	8.0	1	4.3
BHPCC-2	8.5			
BHPCC-3	9			
BHPCM-1	6.5	7.3	0.7	4.0
BHPCM-2	7.6			
BHPCM-3	7.9			

- L'analyse globale des valeurs moyennes de la résistance en traction par flexion montre que les BHP à base de fumée de silice ont des valeurs légèrement supérieures à celles des BHP avec laitier granulé, cela est le résultat de l'amélioration de la zone d'interface granulats-matrice cimentaire qui est obtenue grâce aux réactions pouzzolanique. On peut constater aussi une augmentation significative de la résistance en traction par flexion avec l'utilisation des granulats artificiels, ceci est dû à la bonne adhérence granulats-matrice.

III.3.2.1. Effet de la nature des granulats et des additions minérales

Les courbes Charges – Déplacements (flèches) pour les différents types de BHP à base de granulats naturels et des deux additions minérales sont représentées sur les figures III.11 et III.12.

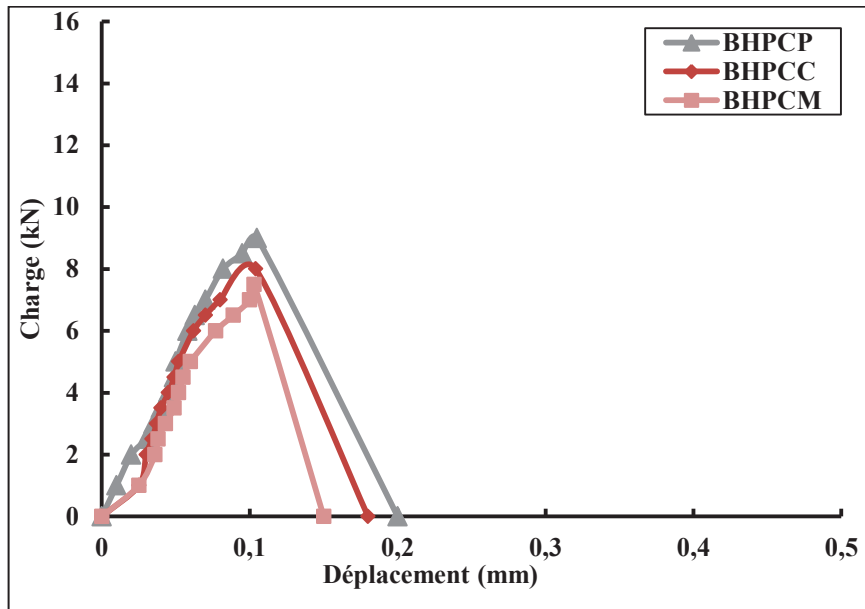


Figure III.11. Courbe Charge - Déplacement des BHP avec fumée de silice (Effet de la nature des granulats naturels).

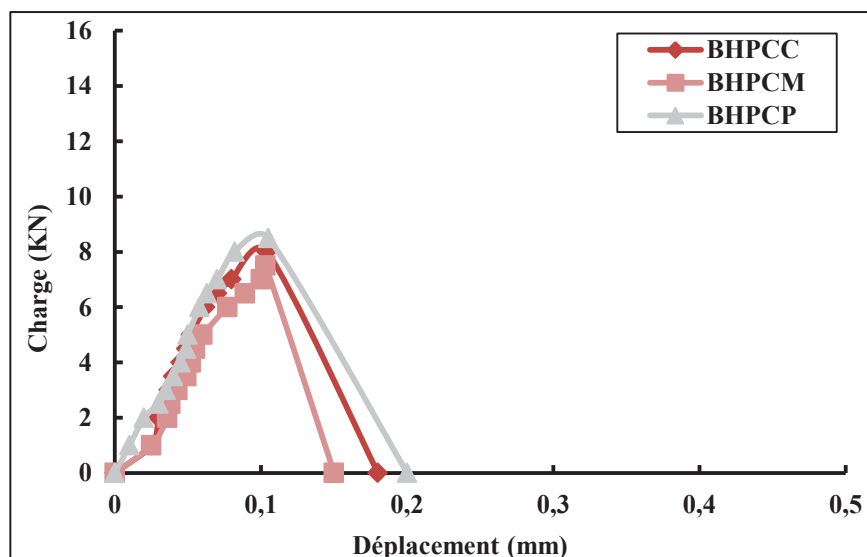


Figure III.12. Courbe Charge - Déplacement pour les BHP avec laitier granulé (Effet de la nature des granulats naturels).

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

D'après les tableaux III.3 et III.4 et les figures III.11 et III.12, on peut constater que :

- La charge de rupture des BHP à base de granulats de calcaire pur blanc est la plus élevée et par conséquent ces BHP présentent les meilleures résistances en traction par flexion par rapport à celles des BHP à base de granulats de calcaire cristallin gris ou calcaire marneux noire. Cela peut être attribué à la bonne adhérence entre le calcaire pur blanc et la pâte de ciment.

- L'influence de la nature de l'addition minérale sur le comportement en traction par flexion des différents types de BHP est négligeable.

Les figures III.13, III.14 et III.15 présentent une comparaison du comportement en traction par flexion des BHP à base de granulats artificiels (scorie et laitier cristallisé) et ceux à base de granulats naturels de calcaires. D'après les figures ci-dessus, on remarque que toutes les courbes ont des allures similaires sur le plan forme.

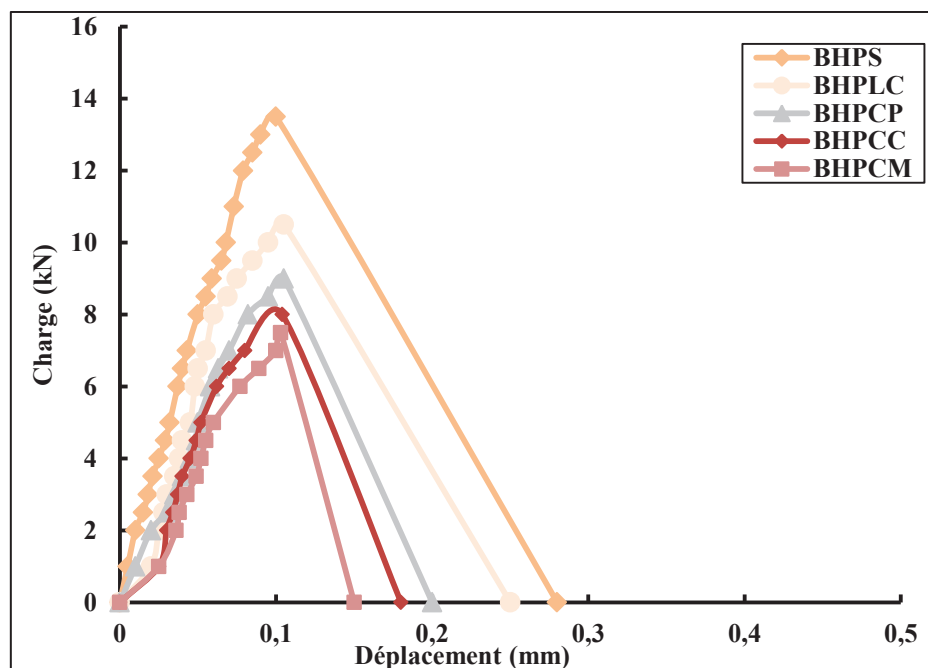


Figure III.13. Courbe Charge - Déplacement pour les BHP avec fumée de silice (Effet de la nature des granulats artificiels et naturels).

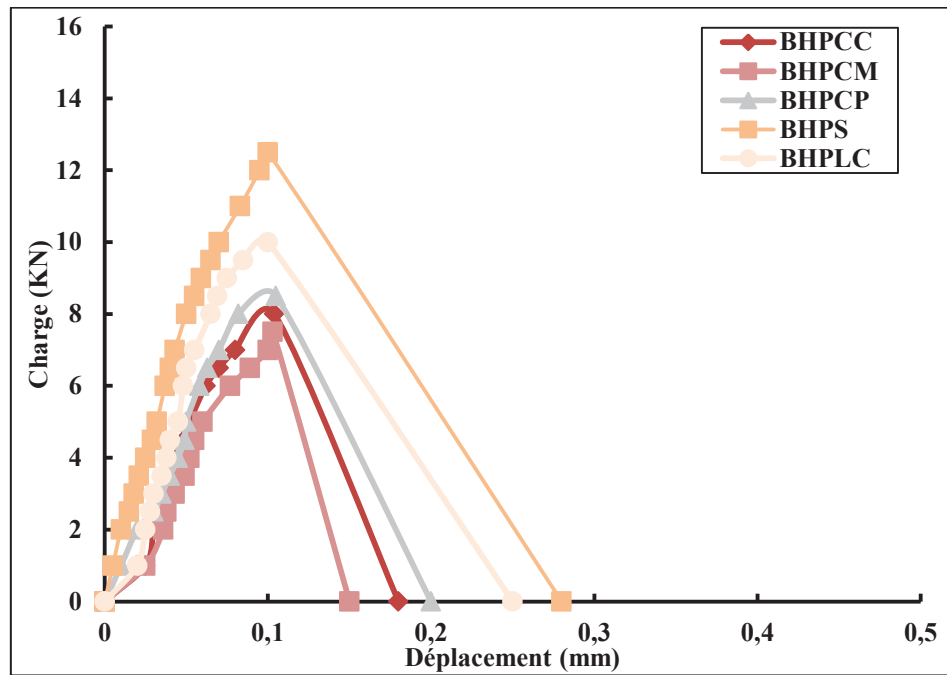


Figure III.14. Courbe Charge - Déplacement pour les BHP contenant du laitier granulé (Effet de la nature des granulats artificiels et naturels).

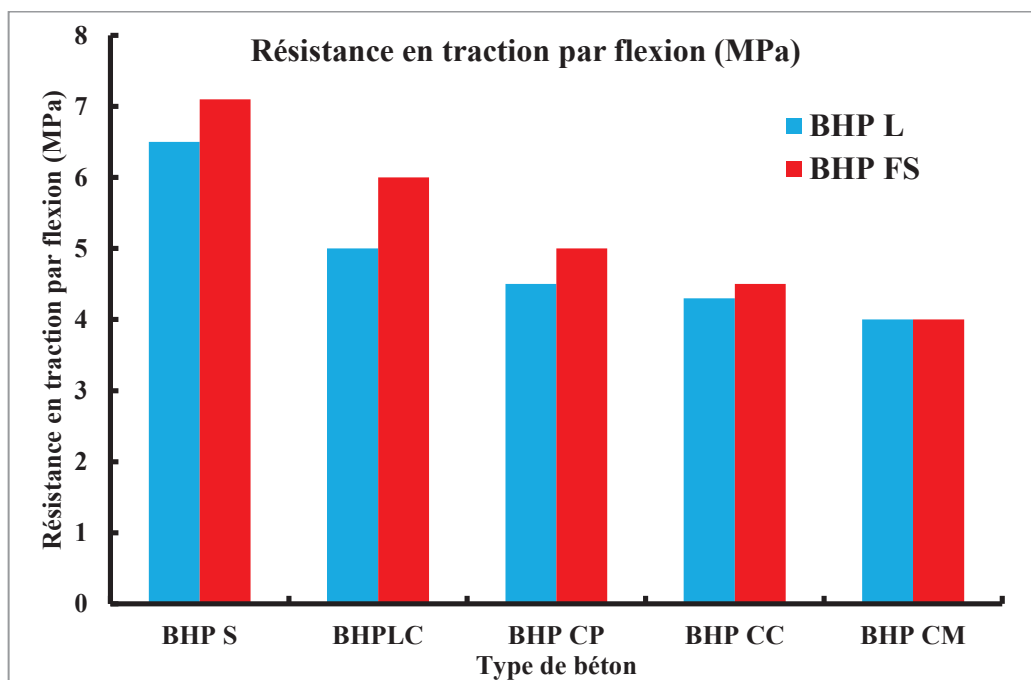


Figure III.15. Résistance en traction par flexion à 28 jours des BHP.

Par la lecture des figures III.13, III.14 et III.15 on peut constater que :

- les résistances mécaniques en traction par flexion, des BHP à base de granulats artificiels sont plus élevées que celles des BHP avec granulats naturels. Cela s'explique d'une part par leur morphologie (rugosité et état de surface) qui favorise l'adhérence pâte hydratée-granulat contribuant ainsi à l'amélioration de la résistance et d'autre part par les ponts d'ancrage de la pâte de ciment avec les granulats de scorie ou de laitier cristallisé poreux. Aïtcin [Aïtcin 1966] a également signalé l'effet positif de l'utilisation du laitier cristallisé comme granulat grossier dans le béton, il s'agit (selon Aïtcin) en plus des nombreuses aspérités de surface des grains de laitier, créant une topographie particulièrement propice à l'excellente adhérence par effet de tenaille. Les accolements epitaxiaux paraissent possibles entre les cristaux de mélikite du laitier et ceux de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérés lors de l'hydratation du ciment portland présentant une autre cause. En effet la mélikite présente un plan de clivage imparfait au niveau d'un doublé de plan d'atomes de calcium.

III.4. Analyse macro et microstructural

Les figures III.15, III.16 et III.17, illustrent la macro structure des BHP à base de granulats de scorie, laitier cristallisé et de calcaire pur blanc.

Et les figures III.18, III.19 et III.20, montrent les zones d'interfaces matrice-granulat, la compacité et la microporosité explorées par une observation au microscope électronique à balayage (MEB).



Figure III.16. Analyse macrostructural des BHP à base de granulats de laitier cristallisé.

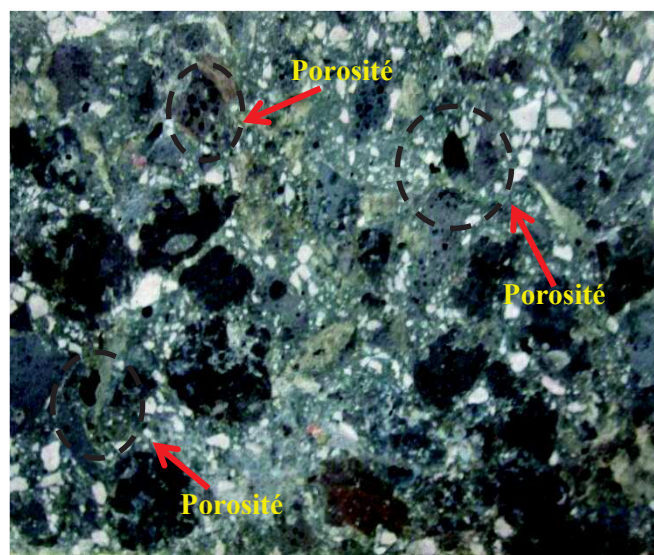


Figure III.17. Analyse macro structural des BHP à base de granulats de scorie.



Figure III.18. Analyse macro structural des BHP à base de granulats de calcaire pur blanc.

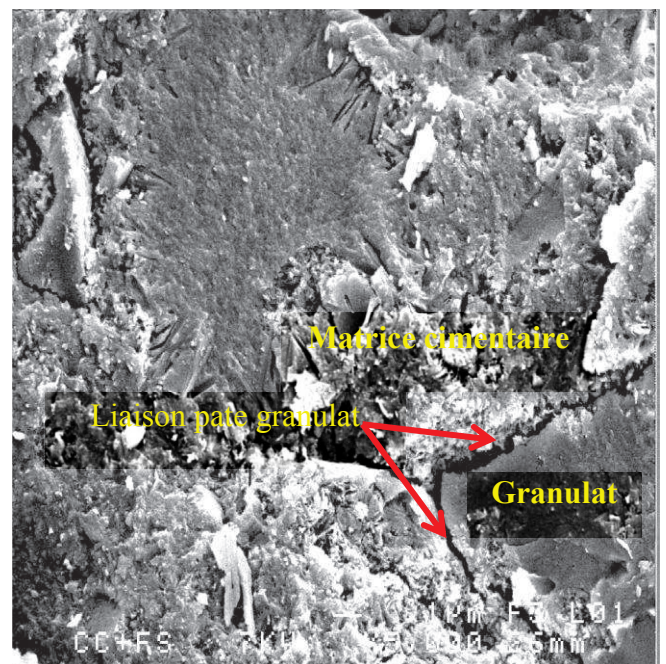
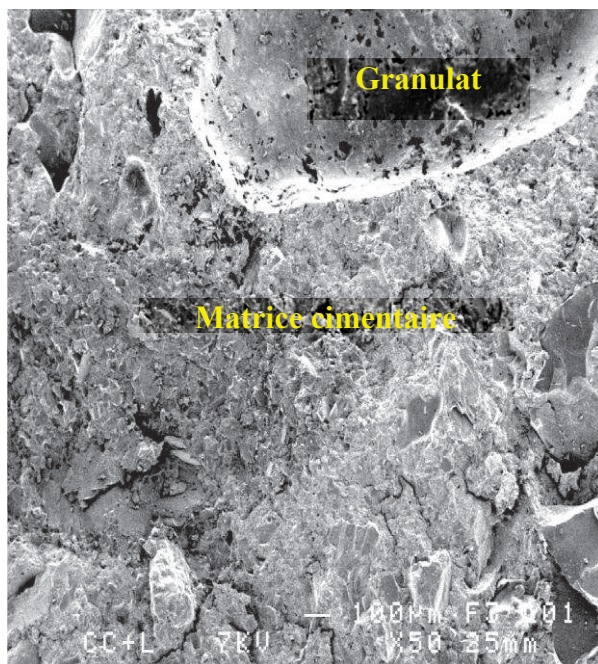


Figure III.19. Photos de MEB pour BHP avec granulats de calcaire cristallin.

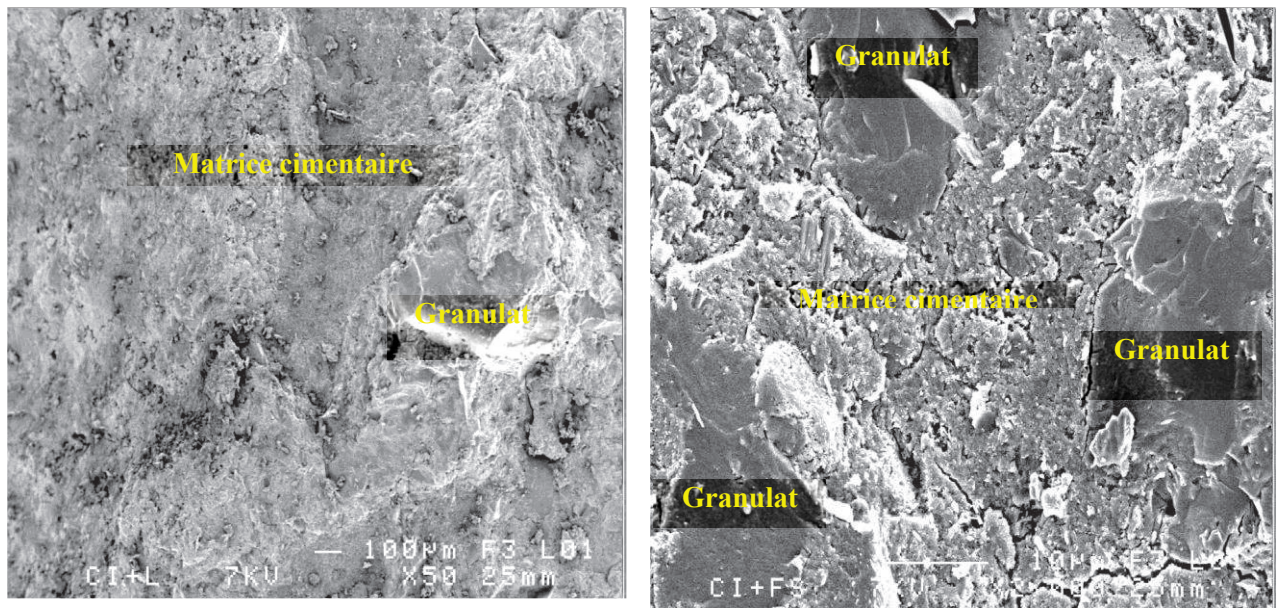


Figure III.20. Photos de MEB pour BHP avec granulats de calcaire pur blanc.

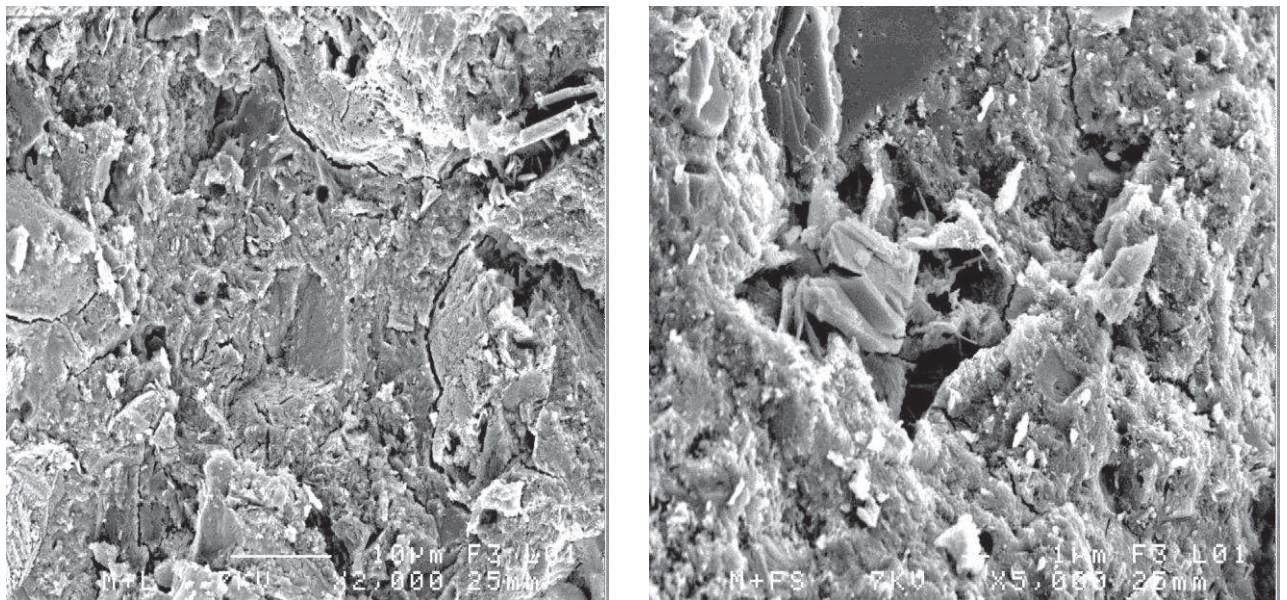


Figure III.21. photos de MEB pour BHP avec granulats de calcaire marneux.

D'après la macro structure illustré par les figures III.15, III.16 et III.17 on peut constater :

- Dans le cas des BHP avec granulats artificiels, les granulats sont bien répartis et bien enrobés dans la matrice cimentaire, avec la présence d'un certain nombre de pores visibles au niveau des grains de scorie ou de laitier cristallisé et même au niveau de la matrice cimentaire.
- La macro structure des BHP avec granulats de calcaire pur blanc est marquée par une structure compacte (absence quasi-total des vides et des macros pores) avec une bonne repartitions des grains.

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) illustrés par les figures III.18, III.19 et III.20 montrent que :

- Avec un agrandissement moyen on peut observer la zone de la matrice cimentaire, les granulats, la compacité de la matrice cimentaire qui présente un minimum de vide et les liaisons intimes granulat-matrice. Les bétons à hautes performances à base de granulats naturels de calcaire pure blanc et filler de laitier granulé présentent une imbrication extrêmement forte des phases d'hydrate de silicate de calcium, une microstructure dense avec un minimum de porosité et une bonne adhérence entre granulats et la matrice cimentaire. Une microstructure dense semblable à celles obtenue pour les BHP à base de fumée de silice. Ces performances peuvent être attribuées à : la nature pouzzolanique des fillers, la granulométrie optimisée, la teneur élevée en grains fins ainsi qu'au faible rapport E/L. Ceci peut justifier les performances mécaniques obtenues.

- Par contre dans le cas des BHP avec granulats de calcaire marneux on observe une structure plus poreuse avec la présence de certaines zones d'interface ou liaison matrice granulat moins intime.

III.5. Conclusion

Le programme expérimental présenté dans ce chapitre, consacré au comportement physico-mécanique et microstructurale des bétons à hautes performances, a mis en évidence l'influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés physiques, l'évolution des résistances mécaniques et la microstructure. A l'issue de l'analyse des différents résultats obtenus les conclusions suivantes peuvent être dégagées:

- La masse volumique des BHP avec granulat de calcaire pur blanc est plus élevée par rapport à celle des BHP avec granulat de calcaire cristallin et calcaire marneux. Les BHP à base de granulat naturel de calcaire pur blanc présentent les meilleures caractéristiques de compacité et de résistance mécanique et ceux avec granulats de calcaire marneux noir présentent les plus faibles résistances. On peut justifier ça aux propriétés intrinsèques des granulats de calcaire pur blanc qui présentent les plus fortes liaisons avec la matrice cimentaire.

- On peut constater que l'introduction des granulats artificiels en substitution aux granulats naturels influence considérablement les propriétés des BHP à l'état durci. Les masses volumiques des BHP avec granulats de scorie ou de laitier granulé sont nettement supérieures à celle des BHP avec granulats naturels. Cela est dû à la densité plus élevée de ces granulats

Chapitre III : Comportement physico-mécanique des BHP

artificiels. Les BHP avec granulats artificiels de scorie présentent les meilleures performances mécaniques en comparaison à ceux de granulats naturels. Cela s'explique d'une part par la forte résistance et les bonnes caractéristiques mécaniques des granulats de scorie et d'autre part de leurs morphologie qui assure une intime adhérence granulat-pâte.

- Les valeurs des résistances en compression à 28 jours des BHP avec la fumée de silice sont légèrement supérieures à celles des BHP contenant le laitier granulé. Ceci présente un avantage pour l'utilisation des fillers de laitiers de haut fourneau directement dans la fabrication des BHP qui peut apparaître intéressant du point de vue: résistance mécanique, durabilité, économie et écologie.

- Les observations au microscope électronique à balayage montrent que les bétons à hautes performances à base de granulats naturels de calcaire pure blanc et filler de laitier granulé présentent une microstructure dense avec un minimum de porosité et une bonne adhérence entre granulat et matrice cimentaire. La macro structure des BHP avec granulats artificiels de scorie montre que les granulats sont bien répartis et bien enrobés dans la matrice cimentaire, avec la présence d'un certain nombre de pores visibles au niveau des grains de scorie et même au niveau de la matrice cimentaire. Ceci confirme les résultats de la résistance mécanique.

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

IV.1. Introduction

La durée de vie d'un ouvrage ou d'une construction en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces trois paramètres sont considérés comme des « indicateurs de la durabilité ».

Ces indicateurs de la durabilité correspondent à trois mécanismes, bien distincts, de transport de matière. La perméabilité décrit un écoulement d'eau ou de gaz qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion [BUI, 1992]. L'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires, elle dépend des pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant.

Le transport de matière par perméabilité ou diffusivité, caractérise l'aptitude à l'usage de béton. Plus la résistance du béton augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité augmente. C'est la raison pour laquelle, la compréhension des mécanismes de transport dans un milieu poreux est très importante.

Les transferts dans une pièce de béton durci s'établissent par l'intermédiaire :

- D'un réseau poreux, qui apparaît normalement dans la structuration de la pâte au cours de son hydratation.
- D'un réseau des fissures qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé (dalles, poutres) et éventuellement de diverses causes accidentelles [BUI, 1992]. Dans ce cas, l'augmentation de la capacité de pénétration de ces agents dans le béton facilite la détérioration de la structure.

Dans ce chapitre on décrit les méthodes expérimentales de caractérisation des indicateurs de durabilité et l'influence de la nature des granulats et additions minérales sur la variation de ces indicateurs et par conséquent sur le comportement physique ou physico-chimique des BHP formulés.

L'analyse complémentaire thermogravimétrique (ATG) est réalisée afin de quantifier la quantité globale d'hydrates formés lors de maturation des pâtes de ciment.

IV.2. Protocol Experimental

IV.2. 1. Porosité accessible à l'eau

La porosité est un paramètre de premier ordre qui influence directement la résistance mécanique et la durabilité des bétons. Elle est définie comme le rapport du volume total des vides et pores ouverts au volume apparent d'un matériau. Le protocole de détermination est décrit dans [AFPC-AFREM 1997]. Cette méthode consiste à effectuer une pesée du matériau dans l'air puis dans un liquide de masse volumique connue. L'essai est conduit dans une ambiance contrôlée (20°C).

Pour chaque type du béton trois échantillons cylindriques de dimensions (Ø11xh5) cm ont été testées après 28 jours de maturation en suivant les recommandations de l'AFPC-AFREM [AFPC-AFREM 1997]. Il s'agit en réalité de peser les échantillons sous différents états. Dans un premier temps il faut s'assurer que les échantillons sont saturés en eau. Pour cela, on les place dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures (Figure IV.1.a), puis on immerge les échantillons dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20 heures ± 1 heures. Après quoi les éprouvettes subissent une pesée hydrostatique (Figure IV.1.b).

Grâce à cette pesée on obtient la masse du corps d'épreuve immergée M_{eau} . Toujours saturée, les éprouvettes sont ensuite pesées à l'air, on obtient alors M_{air} , la masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air. La troisième pesée nécessite un passage dans une étuve de séchage à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, jusqu'à stabilisation de la masse de l'échantillon qui sera alors supposé sec. La dernière pesée nous fournit M_{sec} , la masse sèche du corps d'épreuve. On détermine finalement grâce à ces trois masses la porosité accessible à l'eau ε en % (Voir Eq. IV.1) et la masse volumique apparente sèche ρ_d en g/cm^3 (Voir Eq. IV.2).

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad \text{Eq: IV.1}$$

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad \text{Eq: IV.2}$$

Avec :

M_{eau} : la masse en gramme du corps d'épreuve immergé dans l'eau.

M_{air} : la masse en gramme du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air.

M_{sec} : la masse en gramme du corps d'épreuve sec.



a- Dessiccateurs à vide pour le dégazage des échantillons



b- Pesée hydrostatique

Figure IV.1. Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau (LMDC- INSA Toulouse).

IV.2.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Le transfert de liquides dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface dans les capillaires, est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides a lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans un béton par remontée capillaire. Il consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C selon la procédure [AFPC-AFREM 1997].

IV. 2.2.1. Préparation des échantillons

L'essai a été réalisé suivant la recommandation de l'AFPC-AFREM [AFPC-AFREM 1997], sur des échantillons de BHP de forme cylindrique de dimensions ($\varnothing 15 \times h 5$) cm. Trois échantillons pour chaque type du béton ont été testés, après une cure humide de 28 jours à une température de 20°C.

La procédure de pré-conditionnement des échantillons est la suivante :

- Un séchage de l'échantillon à 80°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (l'état sec est obtenu lorsque deux pesées espacées de 24 heures, ne diffèrent pas plus, de 0,1%),
- L'étanchéité latérale est assurée à l'aide d'enduit de résine (ou de papier aluminium autocollant).

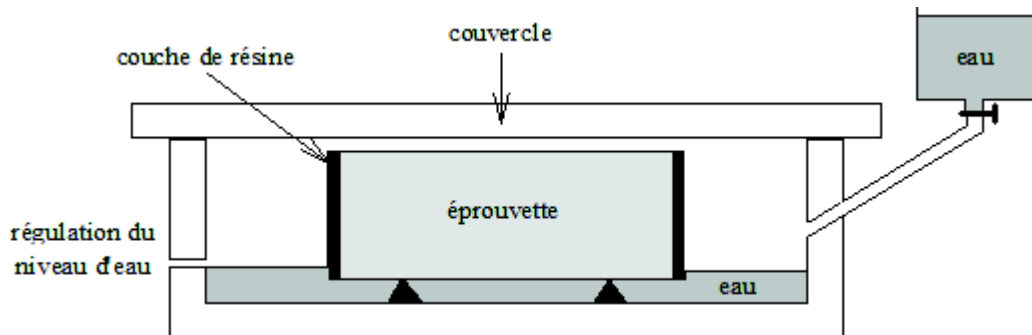


Figure IV.2. Schéma du dispositif de la mesure de l'absorption d'eau par capillarité [AFPC-AFREM 1997].

IV. 2.2.2. Détermination de l'absorption d'eau par capillarité

L'essai consiste à suivre par pesée successive la quantité d'eau absorbée par un échantillon de béton préalablement séché à des échéances de 0,15mn, 30mn, 1h, 2h, 4h, 8h et 24h. Ce qui permet une caractérisation indirecte de la porosité capillaire (Figure IV.2.a et b). Le coefficient d'absorption capillaire est présenté schématiquement en fonction de la racine carrée du temps.

À partir des mesures des masses et pour chaque échéance t , on peut déterminer le coefficient d'absorption capillaire par l'équation (Eq. IV.3):

$$C_{at} = \frac{M_t - M_0}{A} \quad \text{Eq: IV.3}$$

Avec

C_{at} : est le coefficient d'absorption à l'échéance t (kg/m^2).

M_t : est la masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg).

M_0 : est la masse initiale de l'éprouvette (kg).

A : est la section de l'éprouvette au contact de l'eau (m^2).

IV.2. 3. Perméabilité à l'oxygène

Au même titre que la porosité à l'eau, la perméabilité à l'oxygène des bétons est un paramètre essentiel du transfert, elle constitue un indicateur de durabilité dans la mesure où elle permet de caractériser la capacité d'un béton à laisser passer un gaz à travers son épaisseur.

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction de la pression d'essai et de la saturation du matériau, la perméabilité à l'oxygène des matériaux cimentaires.

Cet essai de perméabilité a été effectué sur béton durci avec des échantillons moulés (il est également applicable à des corps d'épreuve carottés dans les limites dimensionnelles de l'appareillage [AFPC 97]). Les échantillons employés dans notre étude sont cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 5 cm. Ces éprouvettes sont soumises à une pression constante d'air (en réalité, trois pressions différentes). La perméabilité du béton testé est déterminée à partir de la mesure du flux de gaz qui se dégage en régime permanent.

Le démoulage des échantillons est effectué à un jour et les éprouvettes sont ensuite conservées dans la salle de cure humide (humidité relative $95 \pm 5\%$) à 20°C pendant 28 jours.

La préparation des échantillons est la suivante :

- Séchage à 80°C jusqu'à masse constante (l'état sec est obtenu lorsque deux pesées espacées de 24 heures, ne dépasse pas la valeur de 0,05%),
- L'étanchéité latérale est assurée à l'aide d'un papier d'aluminium adhésif,
- La pression de confinement latéral est établie à 8 Bars,
- Les pressions d'essais sont 2, 3 et 4 Bars.

L'essai de perméabilité peut alors avoir lieu. Cet essai est effectué pour trois valeurs de pression (2, 3 et 4 bars absolus) pour les trois échantillons. Une moyenne de ces valeurs est calculée.

Le dispositif choisi pour déterminer la perméabilité des bétons est le perméamètre CEMBUREAU qui est l'un des appareils à charge constante les plus utilisés pour les mesures de perméabilité. Cet appareil permet de mesurer la perméabilité aux gaz en régime permanent. Il est capable de mesurer des perméabilités entre 10^{-19} à 10^{-14} m^2 . La figure IV.4 résume le principe de fonctionnement du perméamètre CEMBUREAU.



Figure IV.3. principe de dispositif du perméamètre CEMBUREAU.

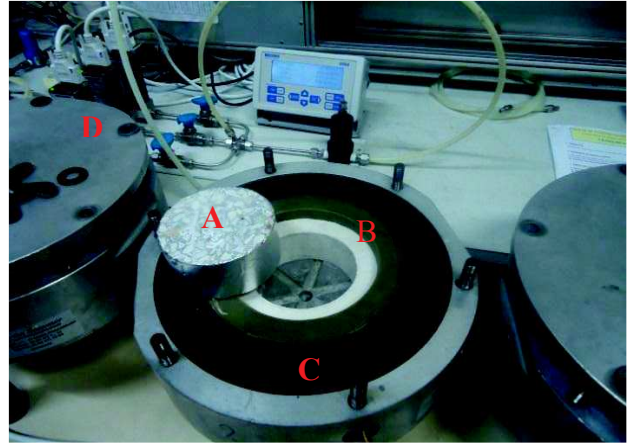


Figure IV.4. Intérieur d'une cellule de perméabilité (LMDC- INSA Toulouse).

A. Echantillon de béton.

C. Chambre à air gonflable.

B. Manchon en polyuréthane étanche.

D. Couvercle avec fixations.

La valeur de la perméabilité est calculée en utilisant la formule de Poiseuille (équation IV.4).

$$K_{app} = 2Q \cdot P_{atm} \cdot L \cdot \mu / A(P^2 - P_{atm}^2) \quad \text{Eq: IV.4}$$

Où L (cm) et A (cm²) sont respectivement l'épaisseur et la section du corps d'épreuve, μ (Pa.s) est la viscosité dynamique du gaz filtrant. P_{atm} (Pa) est la pression atmosphérique de sortie du gaz et P est sa pression d'admission (pression d'entrée).

Le coefficient de Klinkenberg β est en fonction de la finesse du réseau poreux et de la nature du gaz. Ce coefficient est défini par le rapport entre la pente des courbes représentatives et leurs ordonnées à l'origine (K_{int}) (Figure IV.5). La perméabilité intrinsèque (K_{int}) est la valeur limite de la perméabilité apparente lorsque que la pression moyenne du fluide tend vers l'infini, c'est-à-dire lorsque le gaz tend vers une phase condensée (liquide).

A partir des mesures de la perméabilité apparentes on peut déduire la perméabilité intrinsèque K_{int} selon l'approche de Klinkenberg

$$K_{app} = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m}\right) \quad \text{Eq: IV.5}$$

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

P_m : Pression moyenne, $P_m = \frac{(P_1 + P_{atm})}{2}$

β : Coefficient de Klinkenberg.

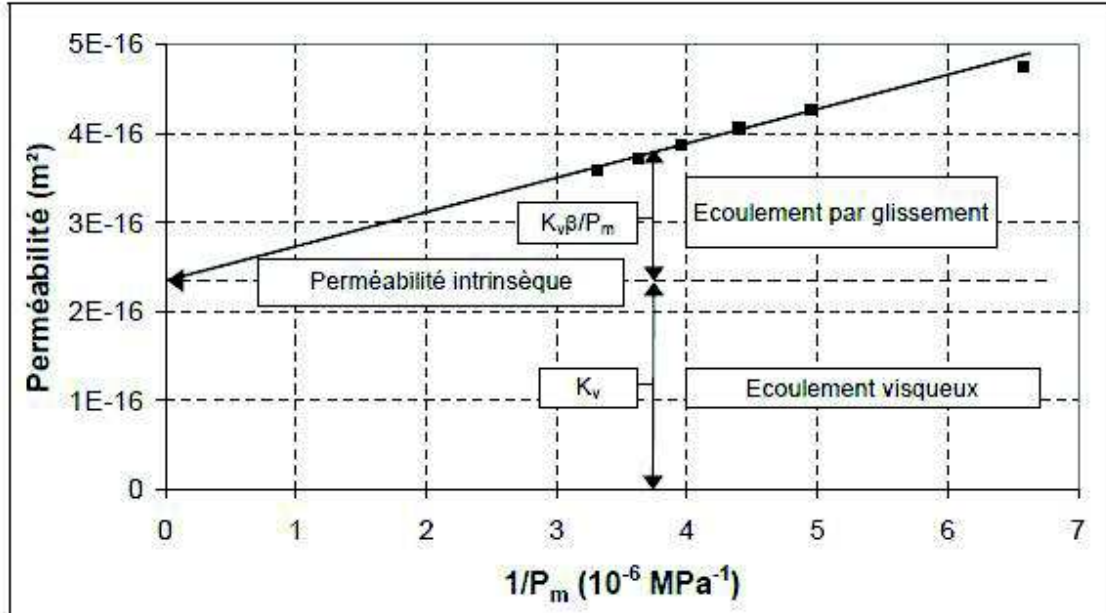


Figure IV.5. Perméabilité en fonction de l'inverse de la pression moyenne [Rozière, 2007].

IV.2.4. Diffusion des ions chlorure

Le coefficient de diffusion des ions chlorure constitue un des principaux indicateurs de durabilité. Dans les milieux exposés aux marées, les ports et les constructions maritimes, les chlorures sont susceptibles de diffuser dans la solution interstitielle provoquant ainsi la dépassement des armatures en acier et remettant en cause la pérennité de l'ouvrage.

Dans des conditions réelles, la diffusion des ions chlorure demande beaucoup de temps qui peut aller de plusieurs jours à quelques mois pour des essais en laboratoire contre plusieurs années pour des essais in situ. C'est dans cette optique que plusieurs recherches sont menées afin de mettre en place des méthodes d'essais accélérées permettant d'avoir des conditions expérimentales équivalente aux conditions réelles. En effet, un compromis entre rapidité et représentativité semble être atteint par un essai de migration en régime stationnaire, dont le mode opératoire est décrit dans la Nordtest méthode NT BUILD 492 [NT BUILD 492 1999]. Cette méthode a fait l'objet de recommandations dans la synthèse des travaux du projet GranDuBé conduits par Arliguie et Hornain [Arliguie 2007].

IV.2.4.1. Préparation des échantillons

L'essai de migration des ions chlorure a été réalisé selon le mode opératoire NT BUILD 492 [NT BUILD 492 1999], la préparation des éprouvettes avant l'essai est la suivante :

Après démoulage à 24 heures et une cure en salle humide (20°C, 95 ± 5% d'humidité relative) pendant 28 jours, les cylindres (Ø11xh22) cm sont sciés pour obtenir trois disques dimensions (Ø11xh5) cm pour la même formulation des BHP. Ils sont ensuite saturés sous vide dans un dessiccateur étanche avec un liquide d'imbibition de même composition que la solution aval ([NaOH] = 1 g/l, [KOH] = 4,65 g/l). Les échantillons sont maintenus sous pression réduite et dans cette solution pendant 20 ± 1h à 20 ± 2°C. Tous les échantillons sont ensuite montés dans la cellule d'essai. L'électrode anodique est introduite dans le bac recevant la solution aval, l'électrode cathodique est installée dans le compartiment amont. L'essai a été réalisé dans une chambre régulée à une température constante de 21°C. La figure IV.6 présente un schéma de la cellule utilisée.

a : Manchon en caoutchouc.

b : Anolyte.

c : Anode.

d : Echantillon.

e : Catholyte.

f : Cathode.

g : Support en plastique.

h : Boîte en plastique.

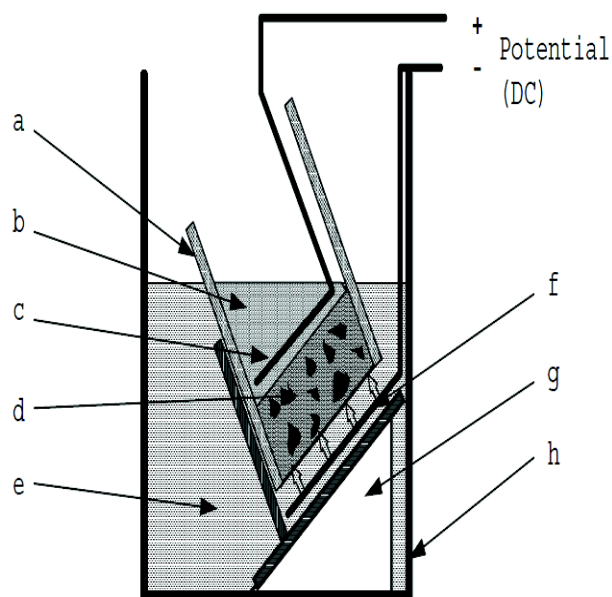


Figure IV.6. Schéma de la cellule de migration [NT BUILD 492 1999].

L'alimentation de courant continu stabilisé est branchée et délivre une tension de $12 \pm 0,1$ Volts. La tension du champ électrique appliquée aux bornes de l'échantillon, varie en fonction de la nature du béton. Celle-ci est déterminée en appliquant une tension initiale de 30V. En relevant l'intensité du courant qui en résulte (I_0), la tension de l'essai sera ajustée en fonction d'un abaque donné par le mode opératoire NT BUILD 492 [NT BUILD 492 1999]

présenté à l'Annexe B. Les figures IV.7.a et IV.7.b montrent deux photographies du montage de l'essai de migration des ions chlorure.



a- Préparation du compartiment amont



b- Vue d'ensemble du dispositif de migration des ions chlorure

Figure IV.7. Essai de migration des ions chlorure (LMDC- INSA Toulouse).

IV.2.4.2. Détermination du coefficient de diffusion

À la fin de l'essai de migration des ions chlorure, l'échantillon est fendu en deux. Un indicateur colorimétrique à base de nitrate d'argent permet de déterminer la profondeur de pénétration des chlorures. Cette profondeur de pénétration apparaît en couleur claire, tandis que la zone ne contenant pas de chlorures apparaît en couleur foncée.

La méthode de mesure de la profondeur de pénétration des chlorures est présentée par la figure IV.8 :

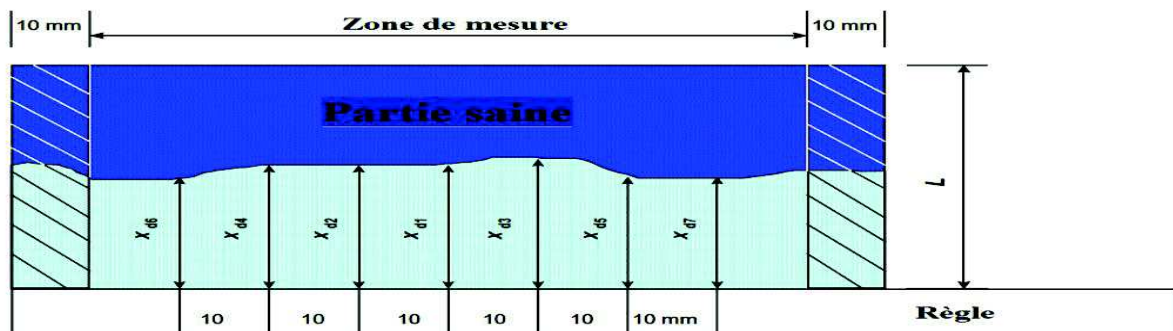


Figure IV.8. Méthode de mesure de la profondeur de pénétration des chlorures [NT BUILD 492 1999].

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

Le calcul du coefficient de diffusion effectif (D_e , u_p) d'un corps d'épreuve s'effectue selon la formule suivante (Eq: IV.6):

$$D_{nsm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} ((Xd - 0.0238) \sqrt{\frac{(273+T)LXd}{U-2}}) \quad \text{Eq. IV.6}$$

Avec : D_{nsm} : coefficient de migration non-stationnaire ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

U : valeur absolue de la tension appliquée (V).

T : valeur moyenne des températures initiales et finales dans la solution amont ($^{\circ}\text{C}$).

L : épaisseur de l'éprouvette (mm).

Xd : valeur moyenne de la pénétration des profondeurs (mm).

t : durée d'essai (heure).

Baroghel-Bouny [Baroghel-Bouny 2004], propose une classification des résistances des bétons face à la pénétration des ions de chlore selon la valeur du coefficient de migration comme le montre le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Classification des résistances des bétons face à la pénétration des chlorures [Baroghel-Bouny 2004].

Coefficient de migration des ions de chlore $D_{nsm} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$.	Classification des résistances face à la pénétration des chlorures.
>50	Très mauvaise
10 à 50	Mauvaise
5 à 10	Moyenne
1 à 5	Bonne
<1	Très bonne

IV.3. Résultats et interprétation

IV.3.1. Porosité accessible à l'eau

La porosité retranscrit le rapport du volume des vides (pores) par rapport au volume total de pores et de solide. Cette caractéristique, en plus de son influence sur la résistance en compression des matériaux cimentaires, elle affecte aussi et de façon significative la durabilité.

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

Les résultats obtenus par application de la méthode proposée par l'AFPC-AFREM [AFPC-AFREM 1997] de la porosité accessible à l'eau des BHP avec différents granulats et les deux additions minérales sont récapitulés sur le tableau IV.2 et présentés par la figure IV.9.

Tableau IV.2. Porosité accessible à l'eau des BHP testés.

Types de BHP	BHP avec fumée de silice			BHP avec laitier granulé		
	Calcaire pure (CP)	Laitier cristallisé (LC)	Scorie (S)	Calcaire pure (CP)	Laitier cristallisé (LC)	Scorie (S)
Porosité accessible à l'eau (%)	7,38	10,20	11,70	7,72	10,30	11,90
Ecart type (%)	0,28	0,73	1,12	0,73	0,75	0,71
Coefficient de variation (%)	3,79	7,16	9,57	9,46	7,28	5,97

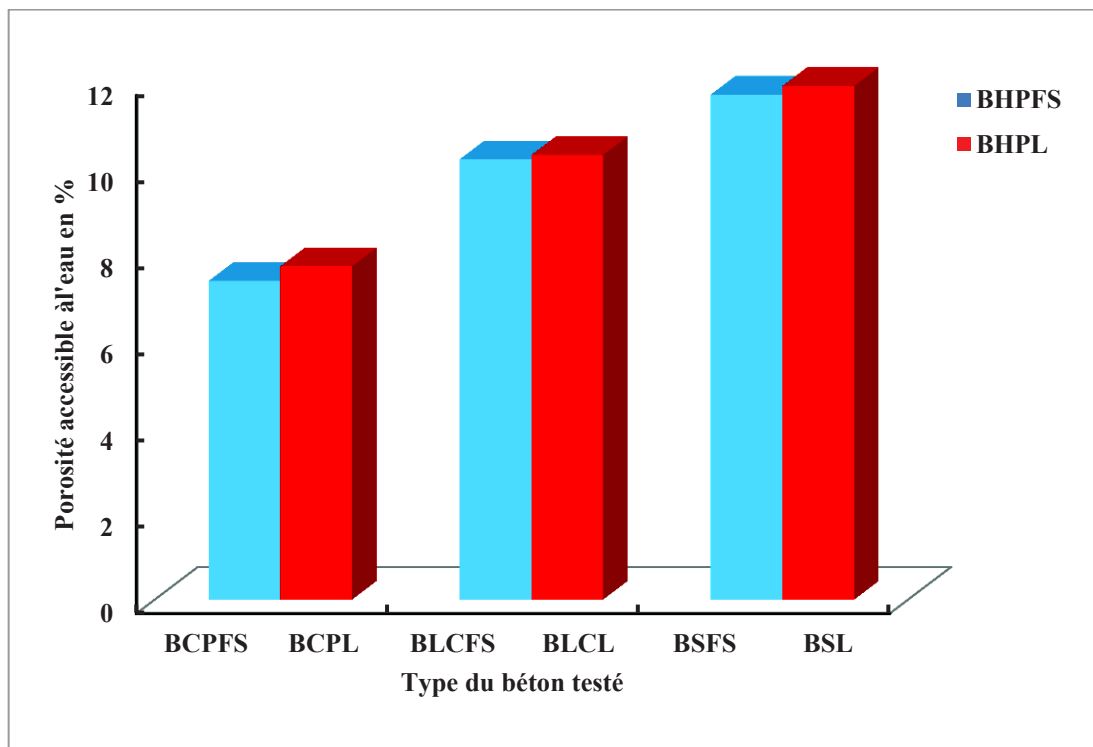
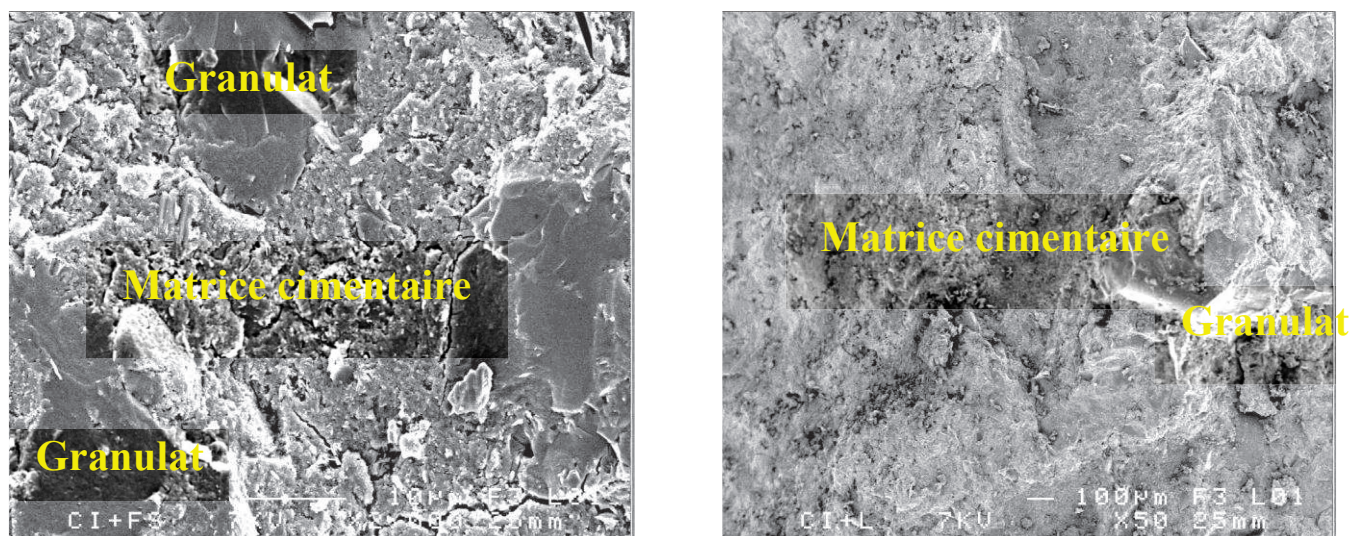


Figure IV.9. Influence des granulats et des additions minérales sur la porosité accessible.

D'après les résultats obtenus on peut constater que les BHP d'études présentent une faible porosité. Ceci est justifié par l'effet de remplissage des additions minérales qui réduit la porosité totale et par l'effet pouzzolanique ou hydraulique qui améliore la compacité de la

matrice cimentaire. Les photos de la microstructure de la matrice cimentaire des deux BHP illustrés par les figures IV.10.a et IV.10.b appuient cette constatation.



a. Cliché MEB d'une matrice avec fumée de silice.

b. Cliché MEB d'une matrice avec laitier granulé.

Figure IV.10. Microstructure de la matrice cimentaire des BHP.

A partir des résultats obtenus on peut signaler deux cas : le premier cas concerne l'effet des additions minérales. Dans ce cas on constate que la porosité des BHP avec filler de laitier granulé est plus élevée que celle des BHP avec fumée de silice. Cela est justifié par la morphologie (anguleuse et rugueuse) et la micro-porosité des filler de laitier granulé.

Le deuxième cas concerne l'effet des granulats. Dans ce cas on peut remarquer que les BHP formulés avec granulats artificiels de scorie ou de laitier cristallisé présentent une porosité plus importante que celle des BHP avec granulats naturels de calcaire pure blanc. L'augmentation de la porosité est justifiée d'un part par la porosité intrinsèque des granulats artificiels et d'autre part par la durée de vibrations qui est relativement supérieure dans le cas des granulats de scorie ou de laitier cristallisé ce qui peut affecter la distribution et la taille des pores. Ceci confirme les résultats obtenus par Samir I. et al [Samir. I 2012], Anastasiou E. et al [E. Anastasiou 2014], G. Adegoloye [G. Adegoloye 2015] et Mauthoor [s. Mauthoor 2016].

La porosité ouverte influence directement la durabilité, en effet, celle-ci est le reflet des caractéristiques intrinsèques du béton qui découlent de sa composition.

IV.3.2. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est un phénomène physique qui caractérise la pénétration des substances agressives de l'extérieur à l'intérieur du béton.

Le béton est en effet un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant les paramètres de composition (rapport E/L, additions minérales, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type de pores, des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire. Le liquide monte d'autant plus haut que le diamètre du capillaire est petit. Les pores capillaires ouvertes sur le milieu extérieur vont donc conduire, dans certaines conditions (principalement d'humidité), à laisser s'infiltrer par succion des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie d'une construction soumise à ces attaques.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité consiste à placer la face inférieure de l'échantillon (fond du disque) au contact avec l'eau et de suivre en fonction du temps, l'évolution de la prise de masse.

Les figures IV.11 et IV.12 présentent les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps, des différents BHP testés, après une cure humide de 28 jours.

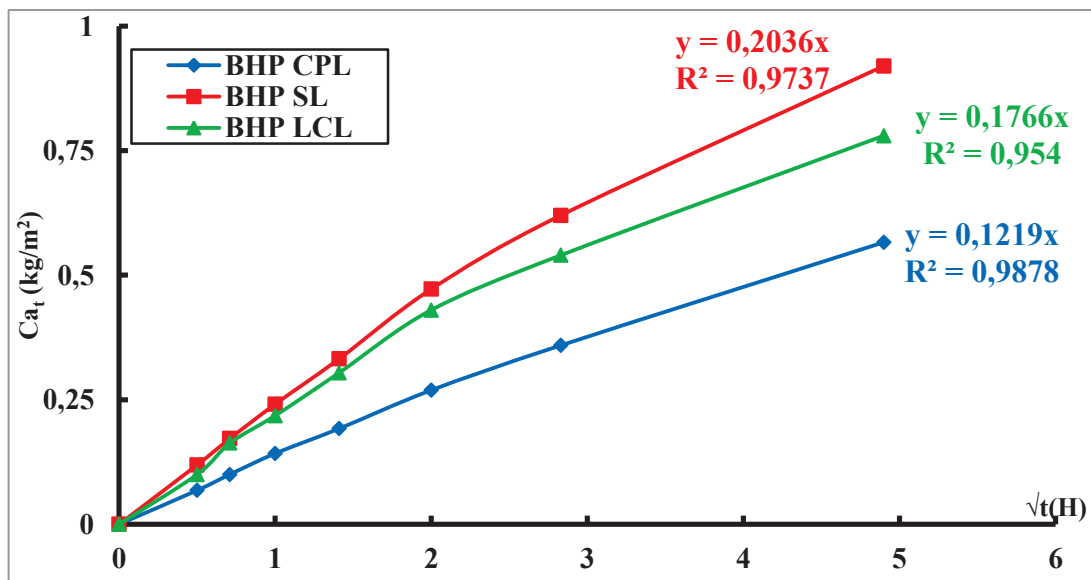


Figure IV.11. Evolution du coefficient d'absorption d'eau des BHP avec FL.

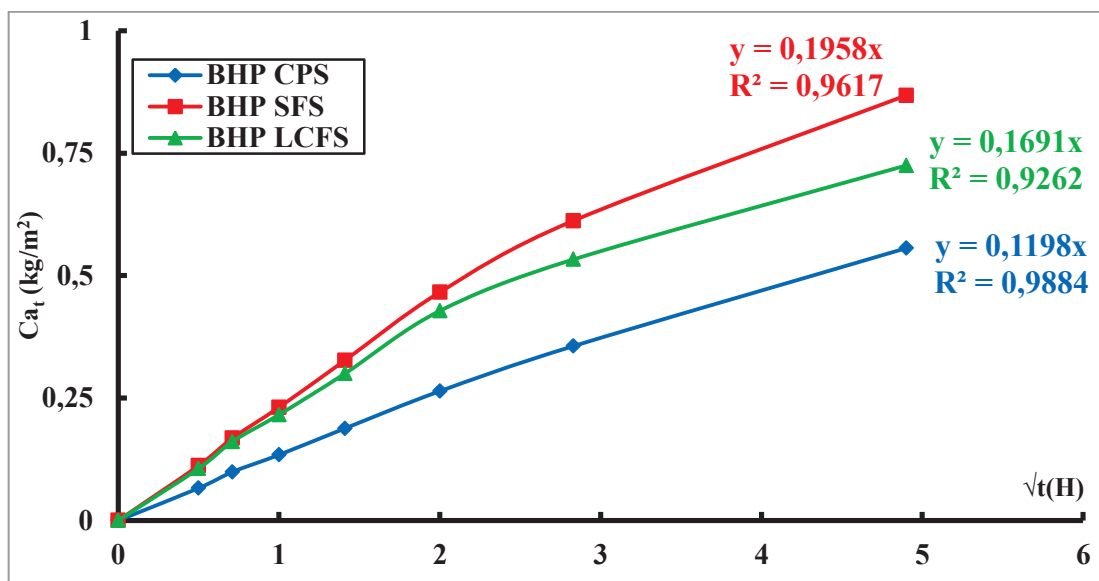


Figure IV.12. Evolution du coefficient d'absorption d'eau des BHP avec FS.

Le coefficient d'absorption caractérise la capacité d'absorption d'un béton dans le temps. Plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption est faible et par conséquent le coefficient d'absorption est faible.

Plusieurs paramètres influencent la cinétique d'absorption d'eau telle que le réseau poreux, la forme, la géométrie et la taille des pores [Bessa- Badreddine, 2004], [Ali- Boucetta, 2014] et [Keikai, 2015].

Les figures IV.11 et IV.12, montrent que les BHP avec granulats artificiels de laitier cristallisé ou de scorie présentent un taux d'absorption plus important que celui des BHP avec granulats naturels de calcaire pur. Cela est dû aux caractéristiques intrinsèques des granulats artificiels. Ce constat confirme les résultats obtenus par Anastasiou et al [E. Anastasiou 2014].

IV.3.3. Perméabilité à l'oxygène

La perméabilité d'un matériau cimentaire se traduit par son aptitude à se laisser traverser par un fluide percolant. Cette caractéristique va être contrôlée par différents facteurs comme :

- la nature du fluide percolant, dans cette étude c'est de l'air, qui est inerte vis-à-vis de la matrice cimentaire,
- la porosité totale du matériau,
- les chemins de percolation qui traduisent la connectivité et la tortuosité du réseau poreux.

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

Les résultats de la perméabilité apparente (K_{app}) en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'essai (P_m), est obtenue par application de l'équation (Eq: IV.4), sont représentés au niveau des figures IV.13 et IV.14 à l'état sec respectivement pour les BHP avec filler de laitier granulé et ceux avec fumée de silice.

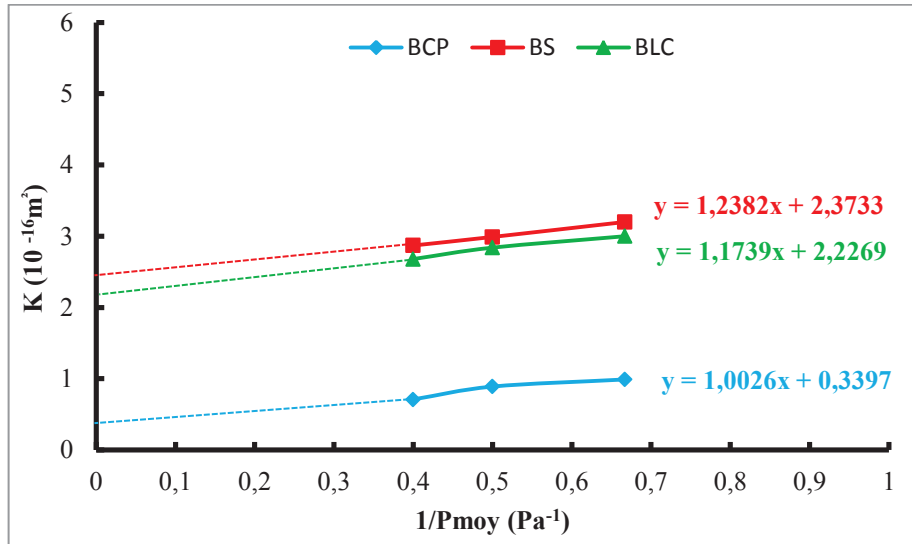


Figure IV.13. Perméabilité à l'air pour BHP avec FL.

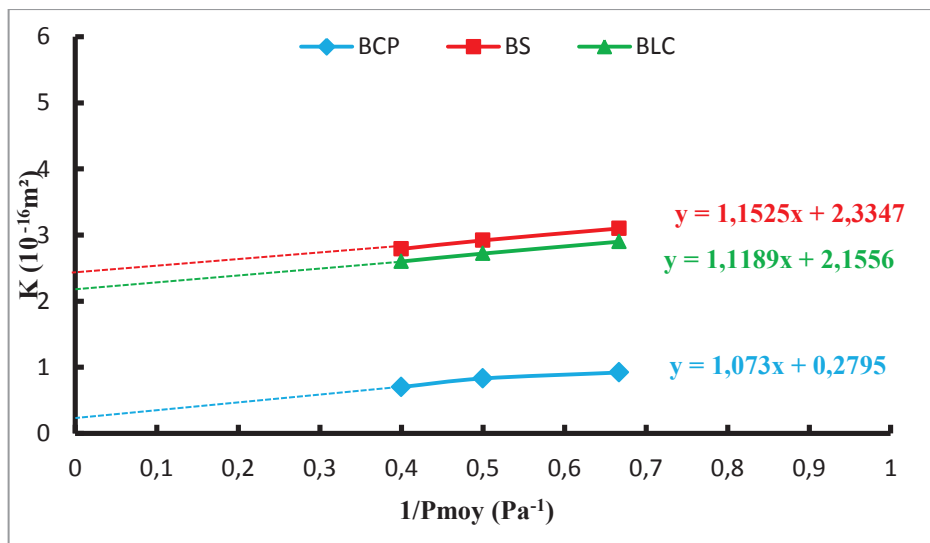


Figure IV.14. Perméabilité à l'air pour BHP avec FS.

➤ Effet de la nature des additions minérales

Comme le montre les figures IV.13 et IV.14, les BHP avec fumée de silice sont moins perméable par rapport à ceux avec fillers de laitier granulé. Cela est attribué à l'effet pouzzolanique et l'amélioration de la compacité grâce à la finesse, la minéralogie et la

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

morphologie des particules de la fumée de silice qui favorise la formation des CSH secondaires suite aux réactions pouzzolaniques.

Dans le même contexte et avec un degré moins, les fillers de laitier granulé, par leur effet hydraulique latent, participent à la consommation d'une partie de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et la formation des CSH secondaires qui servent ainsi à la diminution de la porosité et de la perméabilité. Ces résultats justifient et confirment les résultats de la porosité accessible à l'eau et l'absorption par capillarité.

➤ Effet de la nature des granulats

Selon les figures IV.13 et IV.14, l'effet de la nature des granulats sur la perméabilité est très notable. Les BHP avec granulats de scorie ou de laitier cristallisé sont plus perméable que ceux avec granulats de calcaire. A partir de ces résultats, on peut dire que les BHP avec granulats artificielles présentent un réseau poreux plus important en comparaison avec celui des BHP avec granulats naturels. Les granulats artificiels de laitier cristallisé ou de scorie par leur porosité et leurs morphologies affectent la perméabilité globale. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Samir I. et al. [Samir. I 2012], G. Adegoloye [G. Adegoloye 2015].

Le coefficient de Klinkenberg β , qui est en fonction de la finesse du réseau poreux, nous fournit des informations sur la connectivité et la tortuosité de ce réseau.

Le coefficient de perméabilité intrinsèque est calculé à partir de l'approche de Klinkenberg (selon l'équation IV.5).

Les valeurs du coefficient de perméabilité intrinsèque et du coefficient de Klinkenberg des BHP sont récapitulés au niveau des tableaux IV. 3 et IV.4.

Tableau IV.3. Le coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des BHP avec filler de laitier.

Types de BHP	BHP avec filler de laitier granulé		
Types de granulats utilisés	Calcaire pure (CP)	Laitier cristallisé (LC)	Scorie (S)
$k_{int} (10^{-16} \text{m}^2)$	0,34	2,23	2,37
β (bar)	1,73	0,42	0,52

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

Tableau IV.4. Le coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des BHP avec fumée de silice.

Types de BHP	BHP avec fumée de silice		
Types de granulats utilisés	Calcaire pure (CP)	Laitier cristallisé (LC)	Scorie (S)
$k_{int} (10^{-16} m^2)$	0,28	2,16	2,33
β (bar)	4,63	0,49	0,45

Les résultats des tableaux IV.3 et IV.4 montrent que les BHP avec fumée de silice présentent des coefficients de perméabilité intrinsèque légèrement inférieurs à ceux des BHP avec filler de laitier granulé, cela est dû essentiellement aux propriétés minéralogique, morphologique, pouzzolanique ou hydraulique intrinsèque des deux additions minérales utilisées.

Les BHP avec granulats de laitier cristallisé ou de scorie présentent des coefficients de perméabilité intrinsèque légèrement supérieure à ceux avec granulats de calcaire.

IV.3.4. Diffusion des ions chlorure

Le coefficient de diffusion apparent des différents mélanges est évalué à partir d'un essai de migration en régime transitoire sous une différence de potentiel entre les deux faces de l'échantillon après une cure humide de 28 jours à une température de 20°C. L'essai est réalisé selon le mode opératoire [NT BUILD 492 1999] décrit au paragraphe IV.2.4. Le tableau IV.3 présente les valeurs du coefficient de migration mesurées en régime non permanent ainsi que leurs coefficients de variation pour les six types de BHP étudiés.

Tableau IV.5. Coefficient de migration non-stationnaire des BHP étudiés.

Type du béton	Coefficient de migration $D_{nssm} (\times 10^{-12} m^2/s)$	Coefficient de variation (%)	Résistances à la pénétration des chlorures
BCPL	1.38	1.70	Bonne
BLCL	8.50	4.13	Moyenne
BSL	9.70	5.50	Moyenne
BCPFS	1.20	1.66	Bonne
BLCFS	8.22	3.10	Moyenne
BSFS	9.49	5.48	Moyenne

L'effet de la nature des additions minérales sur la variation du coefficient de migration des ions chlorure des BHP est présenté au niveau du Tableau IV.5. Pour le même type de granulats les BHP avec fumée de silice présentent des coefficients de diffusion légèrement inférieurs à ceux des BHP avec laitier granulé. Ce coefficients est de l'ordre de $1,38.10^{-10}$, $8,50.10^{-10}$ et $9,7.10^{-10}$ respectivement pour les BHP à base de granulat de calcaire pur blanc, granulats de laitier cristallisé, scorie et filler de laitier granulé. Ce coefficient est nettement inférieur pour les BHP avec addition de fumée de silice qui de l'ordre de $1,20.10^{-10}$, $8,22.10^{-10}$ et $9,49.10^{-10}$ respectivement pour les BHP à base de granulat de calcaire pur blanc, laitier cristallisé et scorie. Cela est dû essentiellement à l'activité pouzzolanique de la fumée de silice qui améliore la compacité de la matrice cimentaire et donne naissance aux CSH secondaires suite à sa combinaison avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ceci engendre une diminution de la connectivité par augmentation de la tortuosité et réduit la pénétration des ions de chlore. Ceci confirme les travaux de [Morteza 2013], [Ali Boucetta 2014] et [Keikai 2015].

La diffusion des ions chlore dans un béton est en fonction du volume, des dimensions et de la forme des pores. Ces paramètres sont essentiellement influencés par la nature des additions minérales utilisées dans la formulation de ces matériaux. Ceci confirme les travaux de [Perlot 2005] et [Rozière 2007].

Les résultats de l'effet de la nature des granulats sur la variation du coefficient de migration des ions chlorure, présenté au tableau IV.5, montrent que tous les BHP soit avec les granulats naturels (calcaire pur) ou avec les granulats artificiels (laitier cristallisé ou scorie) présentent une bonne ou une moyenne résistance aux ions chlorure. Les valeurs du coefficient de migration des ions chlorure des BHP avec granulat de laitier cristallisé ou de scorie sont généralement supérieures à celles des BHP avec granulat de calcaire pur blanc. Ceci peut s'expliquer par la différence de la morphologique des trois types de granulats utilisées. Les granulats de laitier cristallisé ou de scorie présentent une porosité plus élevé que celle des granulats de calcaire. Ces résultats obtenus consolident les constatations avancées par [Flora 2015].

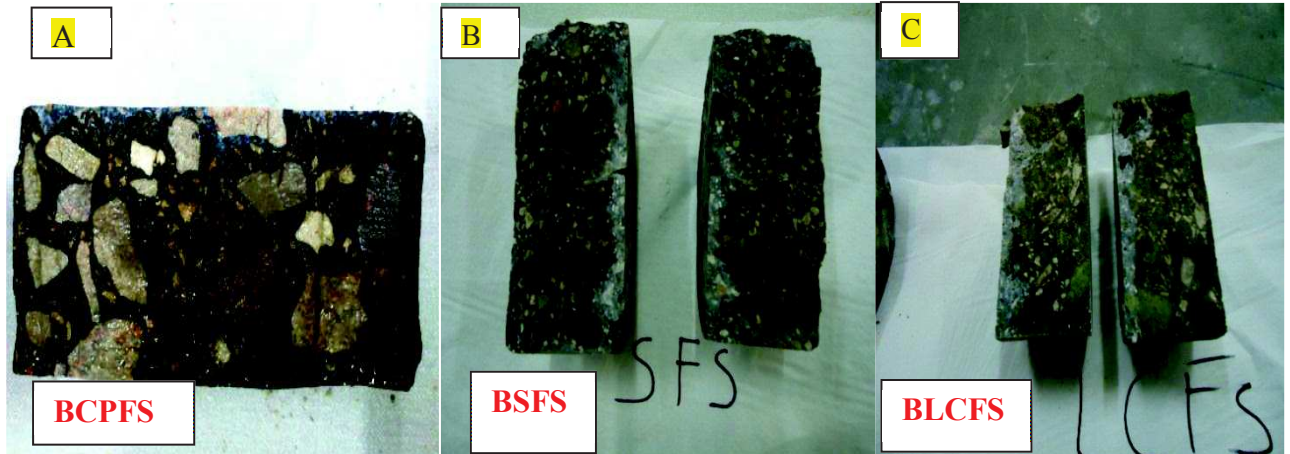


Figure IV.15. Essai de la migration des ions de chlore.

IV.4. Analyse Thermogravimétrique (ATG)

IV.4.1. Introduction

L'analyse thermogravimétrique ATG permet d'analyser et de quantifier les phases minéralogiques composées au sein d'un échantillon. En effet, lors du chauffage, on constate différentes pertes de masse en fonction de la température. Ces pertes sont attribuées à l'évaporation de composés volatils et à la rupture de liaisons chimiques. La température d'évaporation sera fonction de la force de liaison.

Lors d'une analyse thermogravimétrique, les variations détectées sont de l'ordre du millième de gramme et l'échantillon est passé sous gaz neutre tel l'azote ou l'argon. Ce flux de gaz a pour but d'empêcher les réactions entre le composé et le gaz ambiant [Baroghel-Bouny 1994], [Loukili 1999] et [Chen 2009].

Dans le cas d'un matériau cimentaire, on attribue les pertes de masse à quatre phénomènes successifs :

- de 30°C à 105°C : évaporation de l'eau libre ou eau non liée,
- de 105°C à 350°C : déshydratation des C-S-H et de l'ettringite,
- de 450°C à 570°C : déshydroxylation de la portlandite suivant la réaction suivante



- 600°C à 1000°C : décomposition du CaCO_3 sous forme gazeuse. Comme par exemple dans la calcite:



CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

L'étude expérimentale d'identification des phases est menée sur des pâtes des BHP avec granulats naturels de calcaire pure comparées avec des BHP avec granulats artificiels de laitier cristallisé ou de scorie. Les échantillons sont réduits en poudre, de masse d'environ 2g. Les poudres sont broyées à la main au mortier d'agate au passant à 80 μm , puis homogénéisées.

Dans un premier temps, pour la quantification des phases hydratées, on a utilisé les courbes ATG pour quantifier la portlandite (CH). L'évolution quantitative de la portlandite donnera des indications sur l'évolution de la réaction pouzzolanique. Ce type d'essai peut aussi informer sur la quantité globale d'hydrates formés lors de maturation des pâtes de ciment.

La dérivée de la courbe ATG notée DTG (dérivées thermogravimétriques) permet quant à elle d'identifier les différentes phases hydratées présentant un caractère plus amorphe comme les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ou certains aluminates hydratés. En effet il est possible de réaliser une comparaison relative et approximative de la quantité de C-S-H par une comparaison de surface au-dessous de chaque pic.

IV.4.2. Procédure expérimentale

Le principe de l'essai consiste à enregistrer la variation de masse d'un échantillon suivant une montée en température jusqu'à environ 1200 °C. La vitesse de cette montée est généralement fixée à 10° C.min⁻¹ [Ramachandran et al., 2002]. L'appareil utilisé est un dispositif Netzsch STA 499 F3 couplé au logiciel Netzsch Proteus Software pour le dépouillement et l'analyse de la courbe dérivée (voir figure IV.16).



Figure IV.16. Dispositif utilisé pour l'analyse thermogravimétrique (LMDC-INSA Toulouse).

IV.4.3. Manière d'exploitation des résultats de l'ATG et de la DTG

Les résultats obtenus à partir d'une analyse thermique sont traités selon deux aspects qui sont indiqués au niveau de la figure IV.17:

- la courbe brute : pourcentage en perte de masse en fonction de la température (ATG en rouge),
- la courbe dérivée de la perte pondérale dans le temps en fonction de la température et notée DTG/dt en noir).

En parallèle, un suivi en spectrométrie de masse permet de dissocier les pertes de masse associées à la déshydroxylation des hydrates (en bleu sur la Figure IV.17) ou à la décarbonatation de certaines phases (en vert).

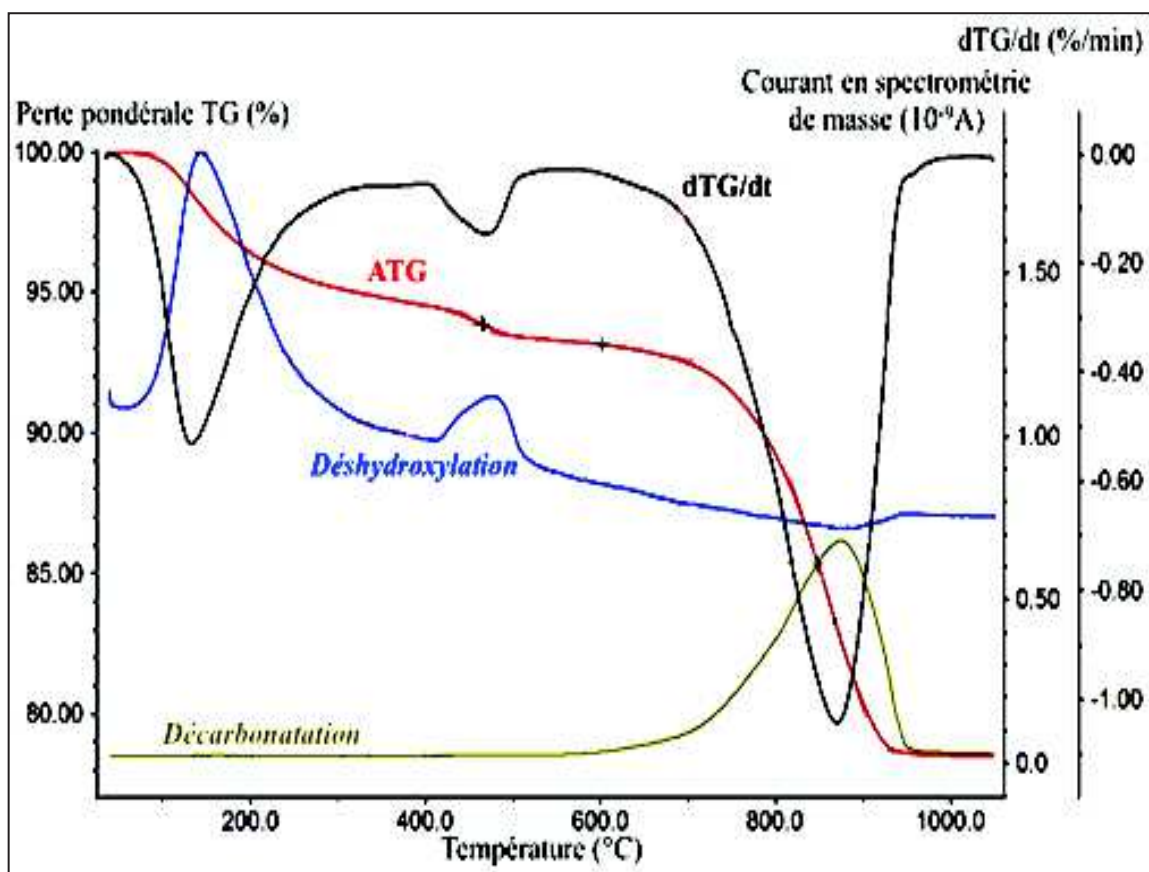


Figure IV.17. Courbes issues d'une analyse thermique et exploitations associées [Le 2014].

L'exploitation de cette analyse est effectuée à l'aide des intervalles de températures associés à la décomposition des phases reconnues, présentées dans le tableau IV.6.

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

Tableau IV.6. Intervalles de températures associés à la décomposition de phases [Cassagnabère 2007].

Intervalle des températures	Décomposition de phases
30 à 105°C	L'eau évaporable est éliminée. Dans cette étude, on s'affranchit de l'eau évaporable grâce au procédé de lyophilisation.
À partir de 80°C	L'ettringite commence à se deshydroxyler.
110 à 170°C	Les décompositions du gypse, avec une double réaction endothermique, de l'ettringite, de certains aluminates de calcium hydratés et des silicates de calcium hydratés (C-S-H pour 100-180°C) interviennent.
180 à 350°C	La perte d'eau est due à la décomposition d'autre C-S-H et des silicoaluminates de calcium hydratés.
450 à 570°C	La déshydroxylation de la portlandite apparaît.
650 à 750°C	La décarbonatation de la calcite de carbonatation.
850 à 920°C	La décarbonatation de la calcite présente dans le ciment ou les granulats.

❖ *Méthode des tangents*

Avec la courbe de la variation pondérale $ATG=f(T^{\circ}C)$ (courbe rouge en Figure IV.16.), plusieurs informations peuvent être obtenues. Les quantités molaires de portlandite $Ca(OH)_2$ et de carbonate de calcium $CaCO_3$ sont calculées à partir de la méthode des tangentes [Cassagnabère 2009] sur les zones de grande variation de pente (A et B sur la figure IV.18. pour $Ca(OH)_2$ et $CaCO_3$ respectivement). Une indication concernant la quantité d'eau chimique liée peut être extraite de cette courbe.

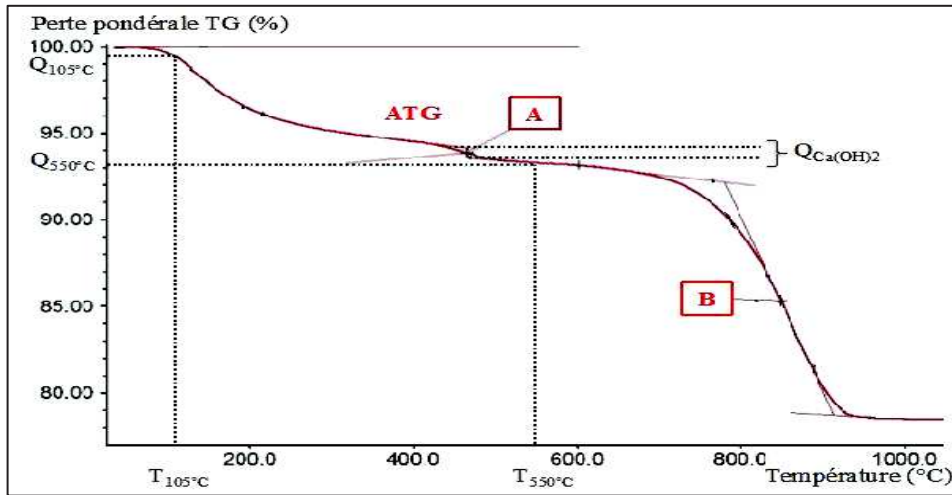
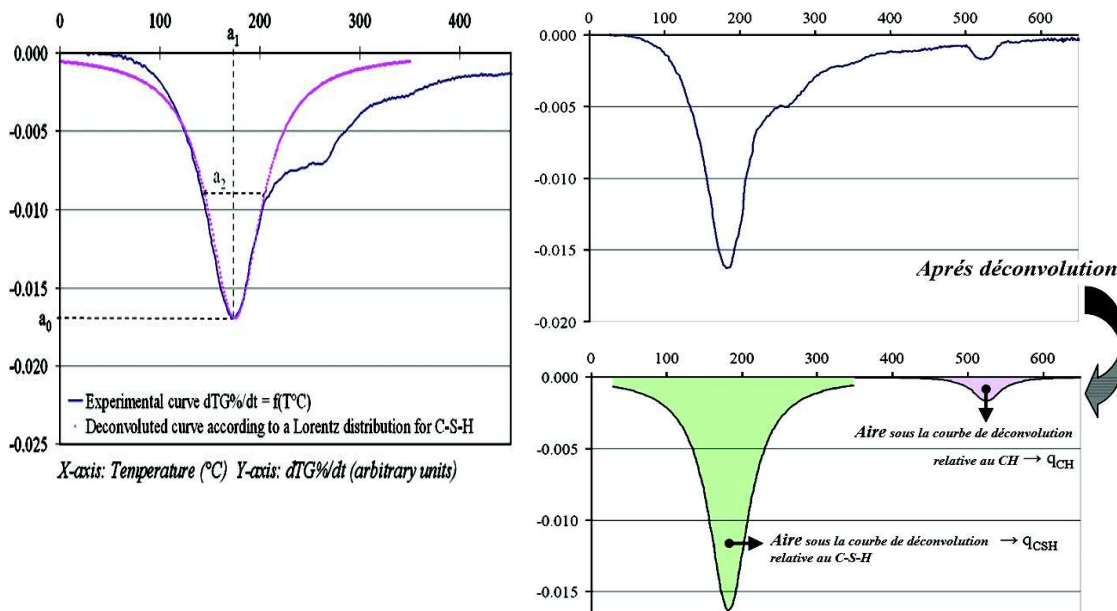


Figure IV.18. Détermination de la quantité de la portlandite par la méthode de tangente.

❖ Méthode de la déconvolution

À partir de la courbe dérivée (courbe noir en Figure IV.14.), $dTG/dt=g(T^{\circ}C)$ plusieurs exploitations pourront être réalisées. Il est possible d'obtenir une semi-quantification de la quantité de C-S-H par la méthode de la déconvolution comme présenté en figure IV.19.

On rappelle qu'il s'agit d'une méthode comparative permettant d'observer les variations de quantité de C-S-H d'une matrice cimentaire à l'autre.



$$dTG(\%)/dt = a_0 / 1 + (T - a_1/a_2)^2$$

Avec :

DTG(%)/dt : valeur dérivée de TG(%)

par rapport au temps,

T: température (°C),

a_0, a_1, a_2 : amplitude, centre et largeur

du pic, respectivement.

Figure IV.19. Analyse d'une courbe DTG en utilisant la méthode de la déconvolution [Cassagnabère 2009].

IV.4.4. Résultats et interprétation

Les résultats des analyses thermiques réalisées sur des échantillons des BHP avec FS et FL sont présentés sur les graphes (figures IV.20, IV.21, IV.22, IV.23, IV.24 et IV.25). Les courbes en pointillés correspondent aux analyses thermogravimétriques (ATG) et les courbes en traits unis à la dérivée de la perte pondérale dans le temps en fonction de la température (DTG).

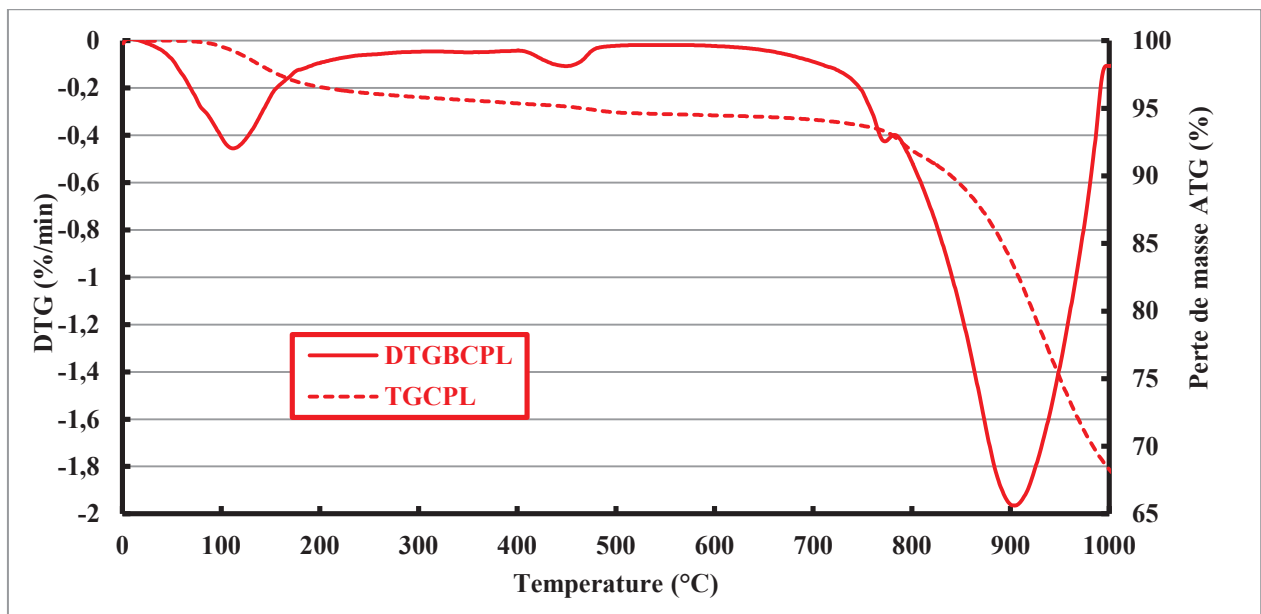


Figure IV.20. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de calcaire pur et filler du laitier granulé.

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

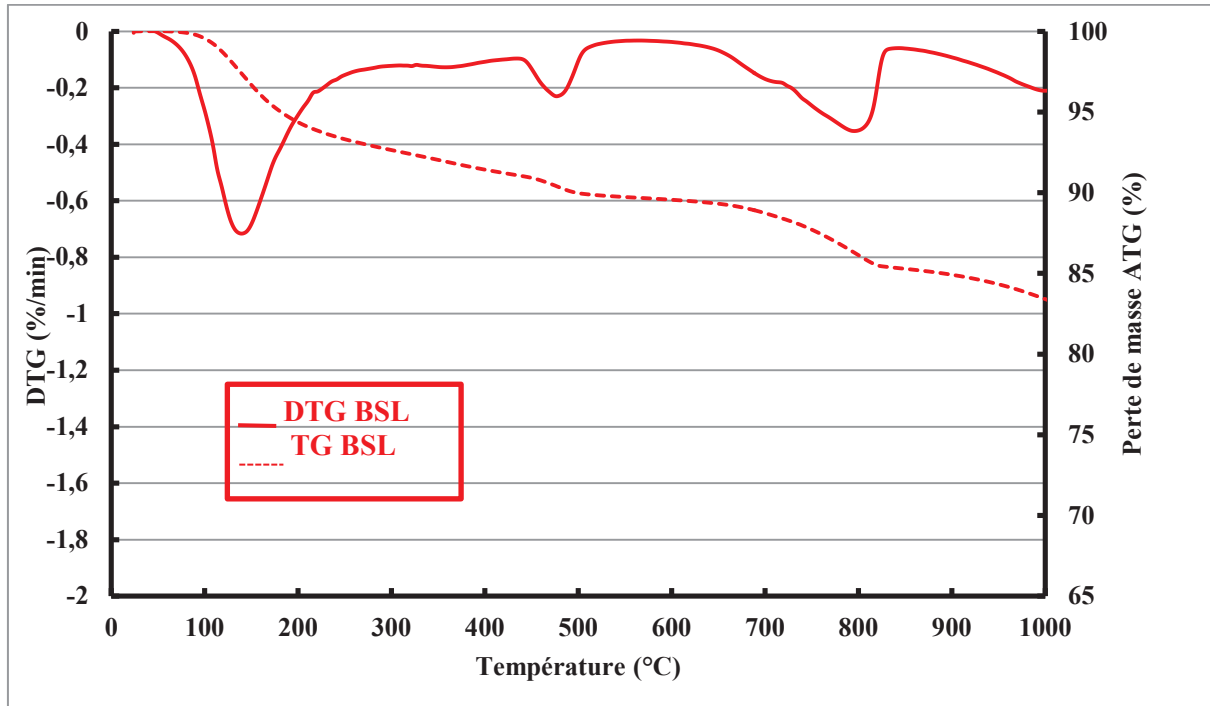


Figure IV.21. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de Scorie et filler du laitier granulé.

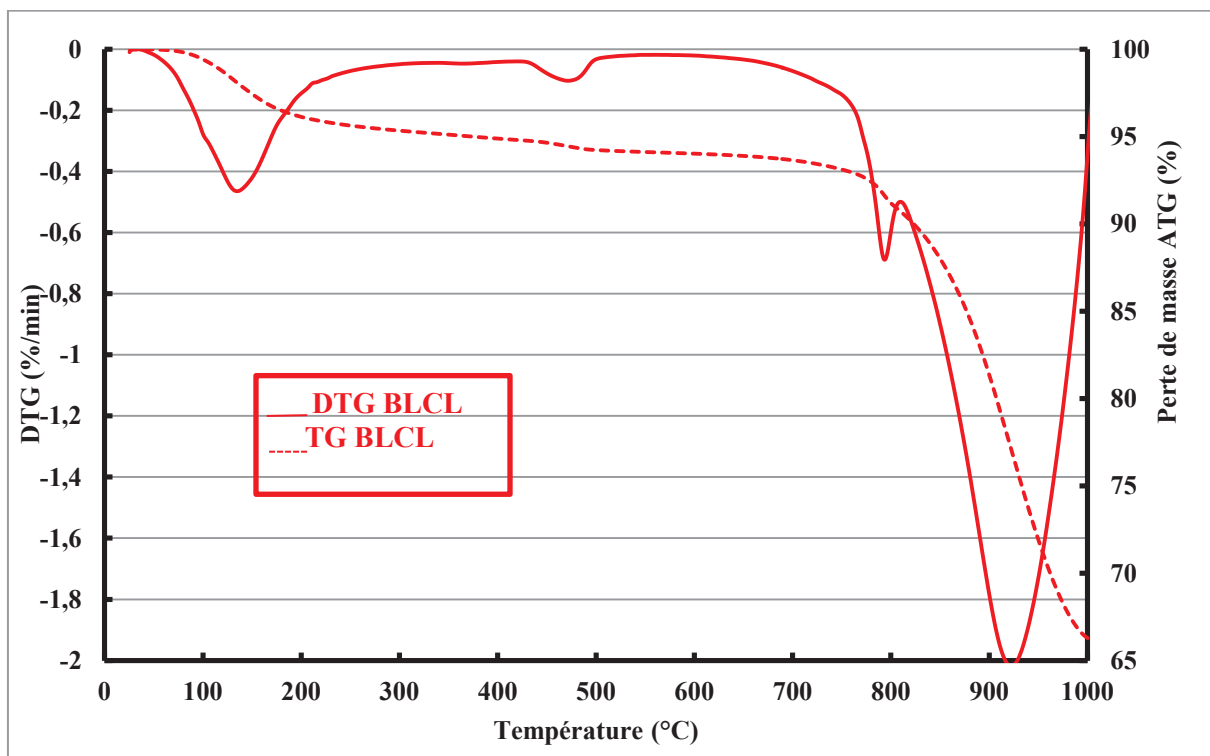


Figure IV.22. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de laitier cristallisé et filler du laitier granulé.

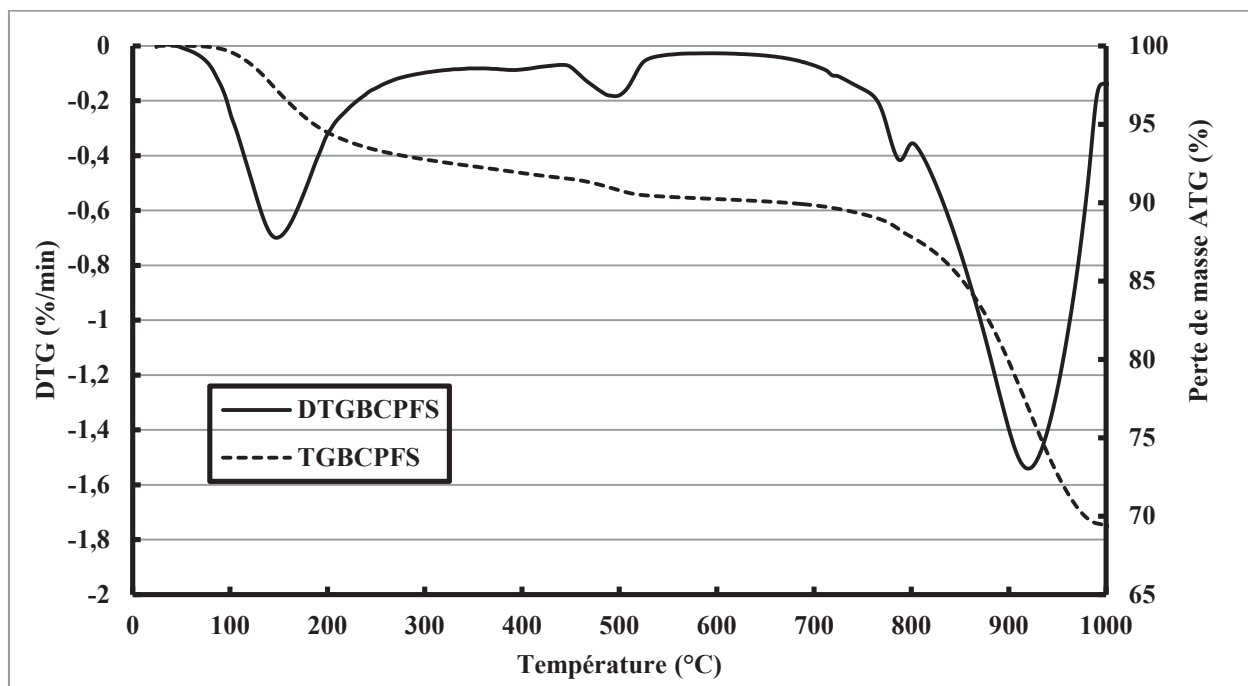


Figure IV.23. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de calcaire pur et fumée de silice.

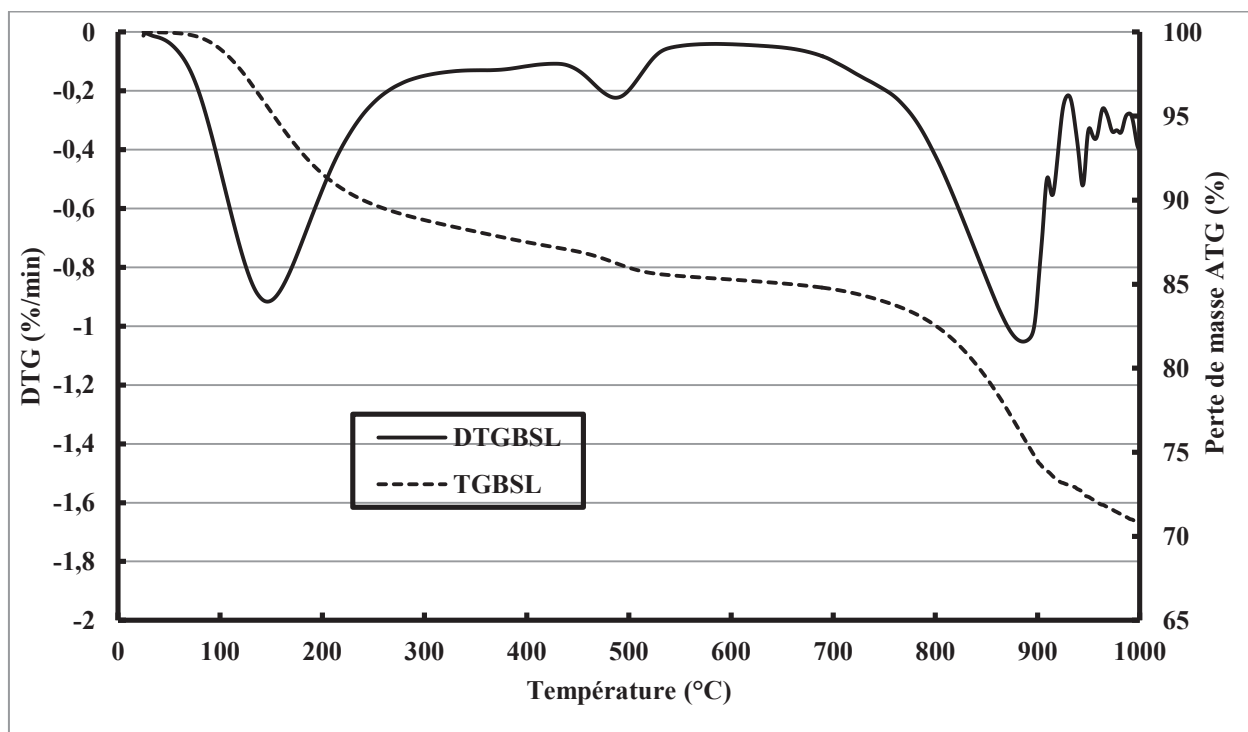


Figure IV.24. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de scorie et fumée de silice.

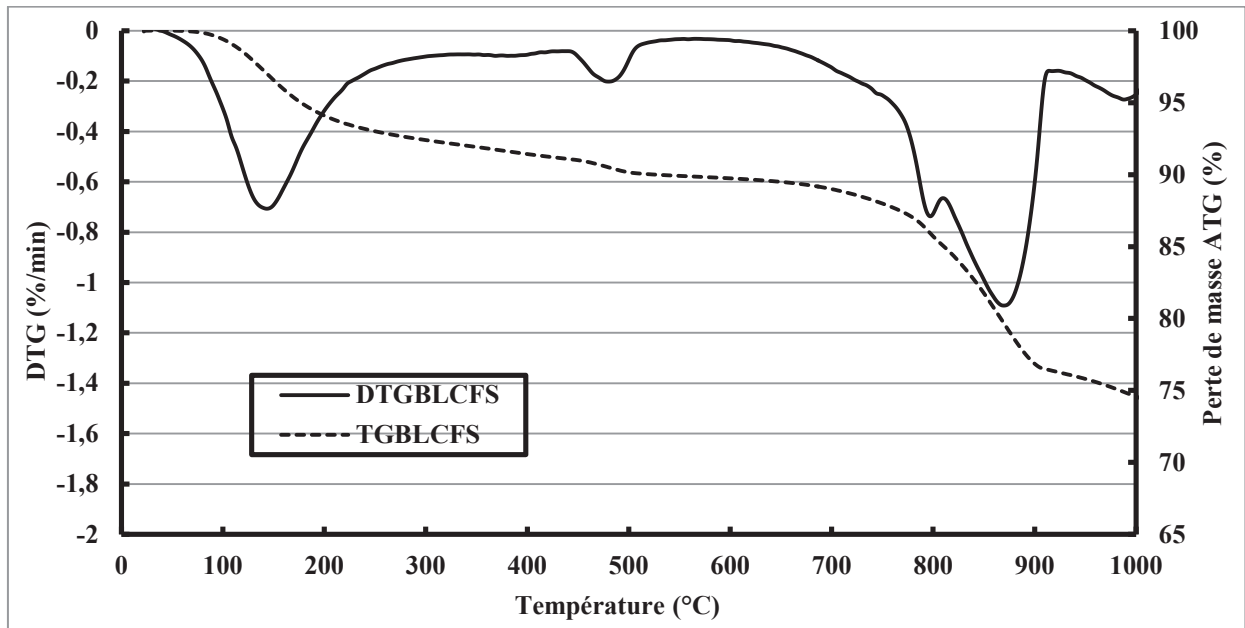


Figure IV.25. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHP avec granulats de laitier cristallisé et fumée de silice.

Par l'examen des résultats des courbes DTG des BHP à base de granulats naturels et avec les deux types d'additions, on peut distinguer les différents pics relatifs aux principales pertes de masse:

- Une première perte de masse aux alentours de 120°C est due à l'évaporation d'eau et à la déshydratation des C-S-H et de l'ettringite [Baroghel-Bouny 1994] et [Chen 2009].
- Une deuxième perte de masse aux alentours de 450°C correspond à la déshydratation de la portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$].
- Une troisième perte de masse très importante, aux alentours de 800°C, traduit la décarbonatation de la calcite contenue dans les granulats calcaires [$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$].
- Les trois pics de perte de masse correspondant aux différentes températures du BHP à base de granulats naturels avec filler de laitier granulé sont très semblables à ceux des BHP à base de granulats naturels avec fumée de silice.

Dans le cas des BHP à base de granulats artificiels de scorie on peut remarquer les mêmes pics qui sont relatifs aux principales pertes de masse mais avec:

- Les pertes de masse aux alentours de 120°C, pour les deux type de BHP à base des granulats artificiels sont très proche et elles sont légèrement supérieure à celles des

CHAPITRE IV : DURABILITÉ DES BHP

BHP avec granulats naturels. cela est dû à l'évaporation d'eau piégé dans les pores de granulats de scorie.

- Une deuxième perte de masse aux alentours de 450°C correspond à la déshydratation de la portlandite [$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$]. Ce pic est très notable dans le cas des granulats de scorie ce qui justifier par la présence de la chaux libre dans les granulats de scorie qui favorise la formation d'une énorme quantité de la portlandite.
- Une troisième perte de masse, aux alentours de 950°C, traduit la décomposition de fer qui se trouve dans les granulats de scories.

❖ Quantification de la teneur en Portlandite

La teneur en Portlandite est un indicateur de premier ordre car cette phase est très sensible à certaines pathologies du béton à long terme (lixiviation, attaques sulfatiques ...). En revanche, ce produit d'hydratation peut aussi s'avérer « protecteur » vis-à-vis de certaines attaques comme la carbonatation. Il est donc intéressant de déterminer la teneur en Ca(OH)_2 .

D'après le tableau IV.5 on peut constater que la teneur en portlandite ramené à la quantité de ciment pour les BHP à base de la fumée de silice est inférieure à celle des BHP à base du laitier. Cela peut s'expliquer par la forte activité pouzzolanique de fumée de silice qui conduit à une vitesse de consommation plus rapide de la portlandite et mène à la formation des phases hydratées néoformés à partir de la portlandite qui sont les C-S-H secondaires.

Tableau IV.7. Teneur en Portlandite selon la méthode de tangente.

Type du béton	m ciment (kg)/m ³ béton*	% perte H ₂ O**	mCH pour 100kg de béton***	MV béton (kg/m ³)****	mCH/m ³ de béton	%CH ramené à la quantité de ciment
<i>BHPCPL</i>	416	0.53	2.20	2450	54.0	13.0
<i>BHPLCL</i>	416	0.60	2.49	2383	59.4	14.3
<i>BHPSL</i>	416	0.63	2.62	2664	69.8	16.8
<i>BHPCPFS</i>	470	0.49	2.09	2446	49.8	10.6
<i>BHPLCFS</i>	470	0.64	2.37	2346	62.4	13.3
<i>BHPSFS</i>	470	0.68	2.83	2623	74.1	15.8

* Voir tableau des formulations;

** Méthode des tangentes par ATG sur l'intervalle de températures [450-550°C];

*** $\text{M}_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 74,8 \text{ mol/g}$ $\text{M}_{\text{H}_2\text{O}} = 18,0 \text{ mol/g}$;

**** MV: Masse volumique déterminé à travers l'essai de porosité.

❖ Quantification de la teneur en C-S-H

A partir de la courbe DTG, il est possible d'obtenir une semi-quantification de la quantité de C-S-H des BHP d'études par l'utilisation de la méthode de la déconvolution comme il est présenté dans les figures IV.26, IV.27 et IV.28. Les quantités des silicates de calcium hydratés (C-S-H) correspondent à l'aire sous la courbe de déconvolution et elles sont récapitulées dans le tableau IV.8.

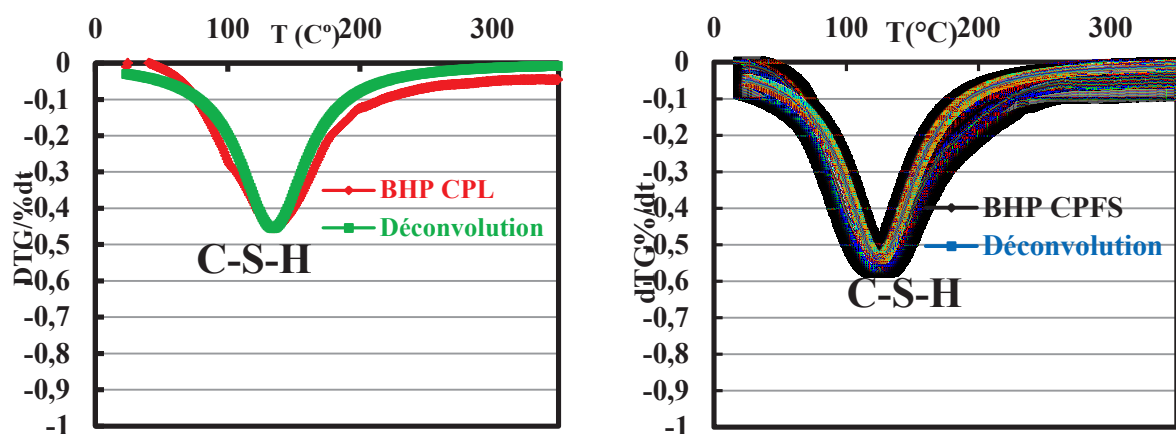


Figure IV.26. Déconvolution des profils de DTG pour la détermination des quantités des C-S-H pour BHP avec calcaire pure et filler de laitier granulé et fumée de silice

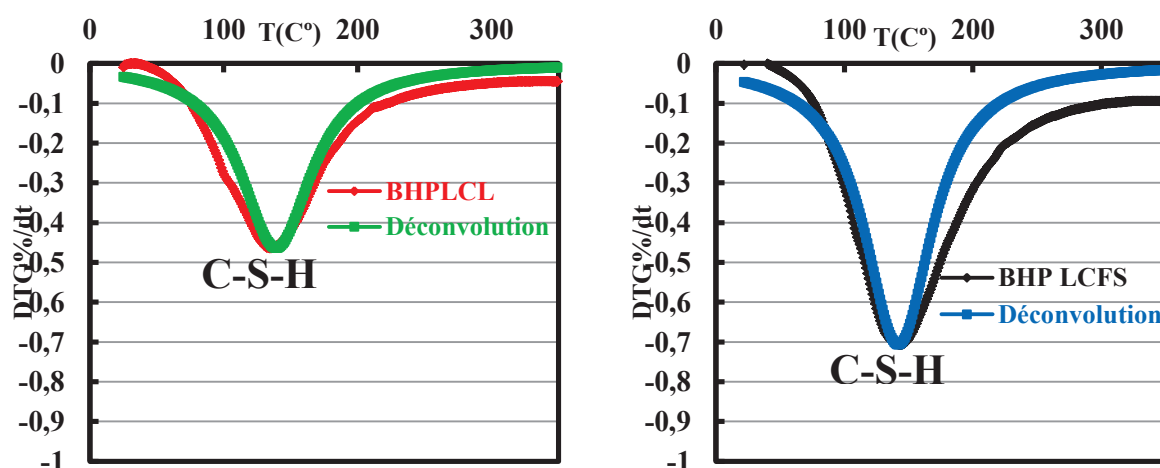


Figure IV.27. Déconvolution des profils de DTG pour la détermination des quantités des C-S-H pour BHP avec laitier cristallisé et filler de laitier granulé et fumée de silice

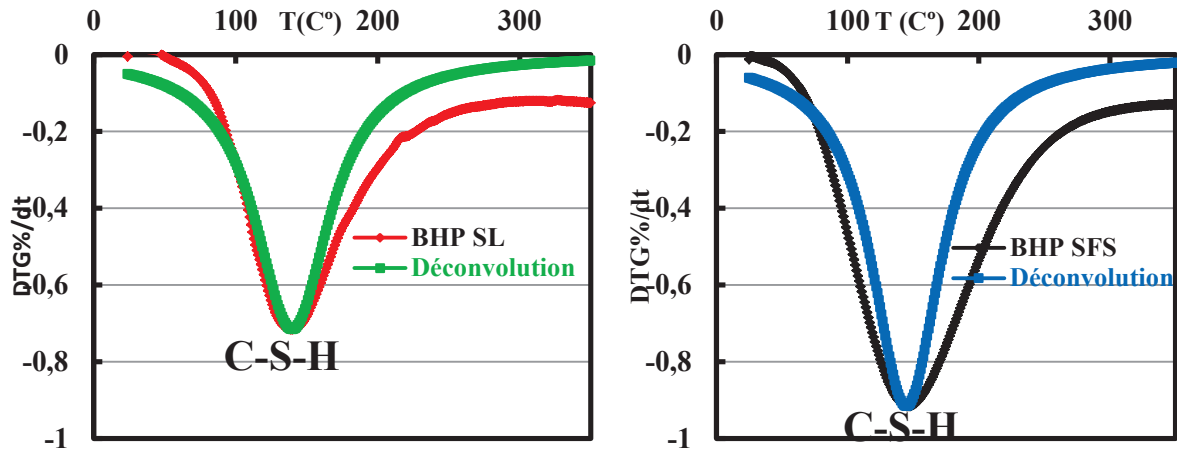


Figure IV.28. Déconvolution des profils de DTG pour la détermination des quantités des C-S-H pour BHP avec scorie et filler de laitier granulé et fumée de silice.

Tableau IV.8. Quantité des C-S-H contenus dans les différents BHP à l'âge de 60 jours.

Types de BHP	BHP avec laitier granulé			BHP avec fumée de silice		
	Calcaire pure (CP)	Laitier cristallisé (LC)	Scorie (S)	Calcaire pure (CP)	Laitier cristallisé (LC)	Scorie (S)
Quantité des C-S-H (unités arbitraires)	- 30.8 (115°C)	- 40.39 (139°C)	- 62.39 (140°C)	- 46.41 (125°C)	- 61.71 (142°C)	-79.97 (145°C)

D'après les résultats illustrés par les figures IV.26, IV.27 et IV.28 et présentés au tableau IV.8, on peut conclure que dans l'intervalle de température [110-350°C], la quantité des C-S-H est plus importante dans le cas des BHP avec granulats artificiels en particulier les granulats de scorie par rapport à ceux avec granulats naturels. Cela peut se traduire par l'existence d'une certaine quantité d'eau piégée au niveau des granulats de laitier cristallisé ou scorie qui contribue favorablement au processus d'hydratation et par conséquent aux réactions chimiques de formation des C-S-H.

IV.5. Conclusion

Le présent chapitre était consacré à l'étude de l'effet de la nature des granulats et des additions minérales sur la durabilité des BHP formulés.

La durabilité est quantifiée par l'étude du processus de transfert qui régissent la durabilité d'un béton en milieu agressif, notamment, la perméation, la diffusion et l'absorption. À la

lumière des résultats obtenus au cours de cette étude, plusieurs enseignements peuvent être tirés.

➤ ***Sur la porosité ouverte :***

- Les BHP à base de la fumée de silice présentent une faible porosité par rapport à ceux avec filler de laitier granulé. Ceci est obtenu grâce à l'effet de remplissage et l'effet pouzzolanique qui réduit la porosité totale et améliore la compacité de la matrice cimentaire.

- Les BHP avec granulats artificiels présentent une porosité plus importante que celle des BHP avec granulats naturels. Cela peut être attribué à la porosité intrinsèque plus élevée de ce type de granulats artificiels.

➤ ***Sur l'absorption capillaire :***

- Les valeurs du coefficient d'absorption par capillarité pour les BHP avec granulats artificiels sont toujours supérieures à ceux avec granulats naturels de calcaire. L'explication s'appuie sur l'importance de la porosité intrinsèque des granulats artificiels.

➤ ***Sur la perméabilité à l'air :***

- Les BHP avec granulats artificiels présentent un réseau poreux plus important en comparaison avec celui des BHP avec granulats naturels. Les granulats artificiels de laitier cristallisé ou de scorie par leur porosité et leurs morphologies affectent la perméabilité globale.

➤ ***Sur la diffusion des ions chlorure :***

- La résistance à la pénétration des ions chlorure des BHP avec fumée de silice est plus meilleure que celle des BHP avec filler de laitier granulé. Cela s'explique par la finesse, la morphologie sphérique et l'activité pouzzolanique de la fumée de silice qui réduit la porosité et la microporosité ainsi que la connectivité du réseau capillaire.

- Les BHP avec granulats artificiels présentent une résistance moyenne à la pénétration des ions chlorure.

➤ L'analyse thermogravimétrique montre que la quantité d'hydrate (C-S-H) est plus importante dans les BHP avec granulats artificiels par rapport à ceux avec granulats naturels. Cela peut se traduire par l'existence d'une certaine quantité d'eau piégée au niveau des granulats de laitier cristallisé ou scorie qui contribue favorablement au processus d'hydratation et par conséquent aux réactions chimiques de formation des C-S-H.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail expérimental présenté dans cette thèse est une contribution à l'élaboration et à l'amélioration des performances des bétons à hautes performances à base de matériaux et sous-produits locaux sous forme de granulats ou d'additions minérales. L'incorporation de ces sous-produits présente des intérêts technico-économiques et environnementaux. La substitution totale de la fumée de silice traditionnellement utilisée dans les bétons à hautes performances par le laitier granulé doit non seulement satisfaire les critères d'ouvrabilité et de performance mécanique, mais présente également des avantages pour la durabilité.

Le programme expérimental réalisé dans le cadre de cette étude a permis de comprendre et d'apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitués les objectifs du présent travail. Plusieurs enseignements ont été tirés :

1. Sur les caractéristiques des granulats et des additions minérales :

- Les masses volumiques absolues des trois types de granulats naturels sont très proches et qui présentent des valeurs inférieures à celles des granulats artificiels. Cela est dû essentiellement à leurs natures minéralogiques qui se diffèrent de celle des granulats naturels.
- Les valeurs du coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels sont très faibles ce qui confirme la bonne compacité de ces granulats. Par contre les granulats artificiels présentent des coefficients d'absorptions plus élevées et par conséquent plus poreux et moins compacts.
- L'essai de los Angeles montre que les granulats de scorie sont mécaniquement plus résistants que les autres types de granulats.
- Les résultats de La diffraction aux rayons X (DRX) traduisent la dominance de CaO dans les trois types granulats naturels de calcaire. Par contre les granulats de scorie sont distingués par une quantité élevée d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'oxyde de magnésium (MgO). Les granulats de laitier cristallisé sont marqués par le taux élevé d'oxyde de silice (SiO_2) et d'oxyde d'aluminium.
- L'essai de l'expansion confirme la présence d'une certaine quantité de chaux libre dans les granulats de scorie utilisées qui a provoqué une expansion moyenne de l'ordre de 5.45%.
- L'analyse par diffraction des rayons X du laitier granulé a donné un diffractogrammes typique d'un matériau vitreux, de composition chimique moyenne présentant toutefois un

CONCLUSION GÉNÉRALE

faible taux d'alumine. Ces caractéristiques ne constituent nullement un inconvénient à son emploi comme addition au BHP. L'emploi du laitier granulé dans les matrices cimentaires a fait l'objet de beaucoup de travaux concluants et appliqués à l'échelle industrielle.

2. Influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les caractéristiques des BHP à l'état frais :

- Pour le même type de granulat, la masse volumique à l'état frais des BHP avec addition du laitier granulé est généralement supérieure à celle des BHP avec addition de la fumée de silice. Cela est dû essentiellement à la différence de masses volumiques intrinsèques des deux types d'additions minérales utilisées.

- Pour le même type d'addition minérale, la masse volumique à l'état frais des BHP est très influencée par la nature des granulats. Les BHP avec granulats de scorie présentent des masses volumiques supérieures à 2700 kg/m^3 et qui sont largement supérieures à celles des autres types de BHP d'étude. Ceci est dû essentiellement à la densité intrinsèque du granulat de scorie qui est de l'ordre de 3820 kg/m^3 .

- L'ensemble des mélanges des BHP présentent des bétons très plastiques ou fluides avec des valeurs d'affaissements aux alentours de 130 mm à 250 mm.

- Par leur nature poreuse et absorbante, les granulats de scorie et de laitier cristallisé affectent la maniabilité des BHP en comparaison à celle des BHP à base de granulats de calcaire plus compact et moins poreux.

- Les BHP à base de la fumée de silice sont légèrement plus maniable par rapport à ceux à base du laitier granulé. Cela est dû principalement à la morphologie sphériques des particules de la fumée de silice qui offre aux BHP une certaine viscosité et un écoulement supérieur à celui des BHP à base de filler de laitier granulé qui présentent des formes plus au moins angulaires et une microporosité plus élevée.

- La nature des granulats influence le volume de l'air occlus. La surface poreuse de scorie et de laitier cristallisé affecte légèrement l'air occlus des BHP. Cela est dû à la bonne maniabilité et à la bonne répartition des granulats qui permettent à la pâte de ciment de mieux remplir les pores.

3. Influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les caractéristiques des BHP à l'état durcis :

CONCLUSION GÉNÉRALE

- concernant les granulats naturels, la morphologie et les propriétés minéralogiques des granulats à une forte influence sur le comportement physico mécanique des bétons à hautes performances. Les BHP à base de granulat naturel de calcaire pur blanc présentent les meilleures caractéristiques de compacité et de résistance mécanique. Cela est dû aux propriétés intrinsèques de ce type de granulas. Ce dernier présente les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment suite aux réactions chimiques qui se produisent dans le temps en augmentant les forces d'adhésion et par conséquent améliorant la qualité de la zone de transition. Les BHP avec granulats de calcaire marneux noir présentent les plus faibles résistances, cela est dû à la nature minéralogique avec la présence d'un certain taux d'argile dans le calcaire marneux.

- Les BHP avec granulats artificiels de scorie présentent les meilleures performances mécaniques en comparaison à ceux avec granulats naturels. Cela s'explique d'une part par la forte résistance et les bonnes caractéristiques mécaniques de scorie et d'autre part de leur morphologie qui assure une intime adhérence granulat- pâte.

- Les valeurs des résistances en compression à 28jours des BHP avec la fumée de silice sont légèrement supérieures à celles des BHP contenant le laitier granulé. Ceci présente un avantage pour l'utilisation des fillers de laitiers de haut fourneau directement dans la fabrication des BHP qui peut apparaître intéressant du point de vue: résistance mécanique, durabilité, économie et écologie.

- Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que l'ensemble des bétons à hautes performances à base de granulats naturels de calcaire pur blanc présentent une microstructure dense avec un minimum de porosité et une bonne adhérence entre granulats et la matrice cimentaire. Ceci peut justifier les performances mécaniques obtenues.

3. Influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les différents mécanismes de transfert :

- Les BHP à base de la fumée de silice présentent une porosité accécible à l'eau légèrement inférieure que celle des BHP avec filler de laitier granulé. Cette faible porosité des BHP à base des deux types d'additions minérales est obtenue grâce à l'effet

CONCLUSION GÉNÉRALE

de remplissage et l'effet pouzzolanique qui réduit la porosité totale et améliore la compacité de la matrice cimentaire.

- Les BHP avec granulats artificiels présentent une porosité accessible à l'eau plus élevée que celle des BHP avec granulats naturels. Ceci peut être attribué à la morphologie des granulats artificiels.

- Les valeurs du coefficient d'absorption par capillarité pour les BHP avec granulats artificiels sont toujours supérieures à ceux avec granulats naturels de calcaire. L'explication s'appuie sur l'importance de la porosité intrinsèque des granulats artificiels.

- Les BHP avec granulats artificiels présentent un réseau poreux plus important en comparaison avec celui des BHP avec granulats naturels. Les granulats artificiels de laitier cristallisé ou de scorie par leur porosité et leurs morphologies affectent la perméabilité globale.

- La résistance à la pénétration des ions chlorure des BHP avec fumée de silice est plus meilleure que celle des BHP avec filler de laitier granulé. Cela s'explique par la finesse, la morphologie sphérique et l'activité pouzzolanique de la fumée de silice qui réduit la porosité et la microporosité ainsi que la connectivité du réseau capillaire.

- Les BHP avec granulats artificiels présentent une résistance moyenne à la pénétration des ions chlorure en comparaison à celle des BHP avec granulats de calcaire pur blanc qui présente une bonne résistance.

- L'analyse thermogravimétrique montre que la quantité d'hydrate (C-S-H) est plus importante dans les BHP avec granulats artificiels par rapport à ceux avec granulats naturels. Cela peut se traduire par l'existence d'une certaine quantité d'eau piégée au niveau des granulats de laitier cristallisé ou scorie qui contribue favorablement au processus d'hydratation et par conséquent aux réactions chimiques de formation des C-S-H.

CONCLUSION GÉNÉRALE

PERSPECTIVE

Ce travail de recherche a conduit à l'élaboration d'une base de données utiles sur le comportement des bétons à hautes performances et l'intérêt de l'utilisation des granulats artificiels dans les bétons à hautes performances et les possibilités d'utilisation de ce nouveau matériau dans les différents types d'ouvrages de génie civil en Algérie. Il ouvre en outre des perspectives et des voies d'investigations supplémentaires afin de préciser les mécanismes à l'origine de certains phénomènes observés.

D'autres études d'investigations sont nécessaires et concerne l'effet du traitement thermique et la résistance au feu des BHP à base des granulats artificiels. Une étude complémentaire de la durabilité de ce type de béton.

RÉFÉRENCE

BIBLIOGRAPHIQUE

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

A

[*Alexander 1989*] Alexander. M.G, Davis. D.E., « *Properties of aggregates in concrete* ». South Africa, Hippo Quarries Technical Publication, 1989.

[*Aïtcin 1995*] Aïtcin P.C., « *Developments in the application of high-performance concretes* ». Construction and building materials, Vol 9, No 1, 1995.

[*Aïtcin 2001*] Aïtcin P.C. *Bétons a Haute Performance*, Editions Eyrolles, 683p. 2001.

[*Aïtcin 2003*] Aïtcin P.C., « *The durability characteristics of high performance concrete*»: a review, Cement and Concrete Composites, 25, pp. 409–420.2003.

[*AZI.M 2006*] AZI.M., «*Caractérisation de nouveaux matériaux de construction béton à hautes performance et très hautes performance*». Thèse de magistère, 2006.

[*Al-Oraimi 2006*] Al-Oraimi. S.K, Taha .R, Hassan. H.F., «*The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete*». Construction and Building Materials, vol 20, pp 499-503, 2006.

[*Asi 2007*] Asi .I.M, Qasrawi .H.Y, Shalabi. F.I., « *Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes* », Can J Civil Eng, vol 34, pp 902-11, 2007.

[*Achoura 2009*] Achoura .D .j., « Influence des conditions de maturation sur les comportements physico-chimique et mécanique des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment », Matériaux & Techniques, vol 96, pp 189–199, 2009.

[*Amouri 2009*] Amouri., « *Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité)* ». Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2009.

[*Arribas 2010*] Arribas. I, San-José. J.T, Vegas. I, Hurtado. J.A, Chica. J.A., «*Application of steel slag concrete in the foundation slab and basement wall of the TECNALIA Kubik Building*». In: Ferrous slag – resource development for an environmentally sustainable world, Proceedings of the 6th European slag conference, EUROSLAG Publication No. 5, Madrid, Spain, p. 251–64, 2010.

[*Ali Boucetta 2014*] Ali Boucetta. T., « *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 d'Annaba, Algérie, 2014.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Anastasiou 2014] Anastasiou. E, Georgiadis Filikas. K, Stefanidou. M, «*Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag*». Construction and Building Materials 50, pp 154–161, 2014.

[Adegoloye 2015] Adegoloye. G, Beaucour. A, L, Ortola. S, Noumowé. A, «*Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability*», Construction and Building Materials, 76, pp 313–321, 2015.

[Alexander 2015] Alexander .S, Brand, Jeffery .R. «*Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties*» Cement & Concrete Composites, 60, pp 1–9, 2015.

B

[Bolomey 1935] Bolomey. J., «*Granulation et prévision de la résistance globale des bétons*» Travaux, 19(30),pp 228-32. 1935.

[Baalbaki 1991] Baalbaki .W, Benmokrane. B, Challal. O, Aitcin .P.C., «*Influence of coarse aggregate on elastic properties of high performance concrete*». ACI Mater J, 88(5), pp499 -503. 1991.

[Baroghel- Bouny 1994] Baroghel-Bouny. V., «*Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons-Méthode, analyse, interprétations*», publié par Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme. 1994.

[Baroghel- Bouny 1998] Baroghel-Bouny. V., «*Texture and moisture properties of ordinary and high performance cementitious materials* », Proceedings of the International RILEM conference, Concrete from material to structure, Arles, France. 1998.

[Baroghel- Bouny 2000] Baroghel-Bouny.V, Ammouche. A., Hornain. H, Gawsewitch. J., «*Vieillesse des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle. II – Caractérisation microstructurale sur éprouvettes de béton de résistance 25 à 120Mpa*», Bulletin de liaison des LPC, 228, pp71-86. 2000.

[Barragan 2001] Barragan. B.E, Giaccio. G.M, Zerbino. R.L., «*Fracture and failure of thermally damaged concrete under tensile loading*», Materials and Structures, Vol. 34, pp 312-319. 2001.

[Behim 2002] Behim. M., Redjel. B, Jauberthie. R, «*Réactivité du laitier de haut fourneau d'Annaba en substitution partielle du ciment* ». Journal de Physique IV, 12 : 223-228, 2002.

[Billard 2003] Billard .Y., «*Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton*», Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Beshr 2003] Beshr. H, Almusallama. A.A, Maslehuddin. M., «*Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete*», Construction and Building Materials, vol 17, pp 97–103, 2003.

[Bessa-Badreddine 2004] Bessa-Badreddine. A., «*Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers* », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France. 2004.

[Bethmont 2005] Bethmont .S, «*Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)* », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, décembre, 159 p, 2005.

C

[Caquot 1937] Caquot A., «*Le rôle des matériaux inertes dans le béton*». Mémoire de la Société des ingénieurs civils de France, Fascicule n°4, juillet-août, pp 562-582.1937.

[Carlsward 2003] Carlsward. J, Emborg. M, Utsi. S, Oberg P., «*Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete*». Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC, Island, Proceedings PRO 33, pp143-153. 2003.

[Chafi 2005] Chafi. Nardjes, «*Matrice cimentaire Renforcée des Fibres; Valorisation des sous-produits (Polstyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois)* », Université Mentouri- Constantine Thèse de magister, Mars 2005.

[Camps 2008] Camps G., «*Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton*». Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 282p.2008.

[Carlo 2009] Carlo. P, Vittorio. G, «*Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate*», Cement & Concrete Composites, 31 , pp 663-671, 2009.

D

[Diamond 1986] Diamond. S., «*The microstructure of cement paste in concrete*», in proceeding of the 8th international congress on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, 1,pp 122-147. 1986.

[de Larrard 2000] de Larrard F., «*Structures granulaires et formulation des bétons*». Etudes et Recherches des Laboratoires des Pons et Chaussées, traduit de l'anglais par A. Lecomte, No OA 34, 420p. 2000.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Demirboga 2001] Demirboga. R, O' ru'ngu'n .I, Gu'l. R., « Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes», Cem Concr Res, vol 31, 1627- 1632, 2001.

[Dreux 2002] Dreux. G, Jean Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, huitième Édition, Edition Eyrolles, 2002.

[De Sa 2007] De Sa.C., «Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton : influence des gradients et des incompatibilités de déformation», Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2007.

[Diederich 2010] Diederich. p, «*Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçants du béton* », Thèse de doctorat de l'Université, Paul Sabatier, 2010.

E

[Ergu'l 2004] Ergu'l. Y, Erdog'an .Y, Kılıc. A., «*Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength*», Materials Letters, vol 58, pp 772- 777,2004.

F

[Faury 1953] Faury. J. «*Le béton, influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers*». 3e édition, Dunod, Paris, pp 66-67. 1953.

[Farran 1956] Farran. J., «*Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés*». Thesis, Toulouse, 1956.

[Ferraris 2001] Ferraris. C.F, Obla. K.H, Hill. R. « *Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete*». Cement and concrete research, vol.31, pp 245-255. 2001.

[Frías Rojas 2002] Frías Rojas .M, Sánchez De Rojas. MI, Uría A, « *Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry*», Mater de Constructions, 52, pp 79–83, 2002.

[Fuat Ko'ksal 2008] Fuat Ko'ksal. a, Fatih Altun. b, Ilhami Yig'it, «*Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes*» ,Construction and Building Materials, vol 22, pp1874–1880, 2008.

G

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Giaccio 1992] Giaccio. G, Rocco. C, Violini. D, Zappitelli. J, Zerbino. R., « *HSC incorporating different coarse aggregates*». ACI Mater J, 89(3), pp 242 –6. 1992.

[Gaher 2004] Gaher. H., « *Analyse de résistance à la traction et retrait de béton à haute performance*». Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, 04 Décembre 2004.

[Gonilho Pereira 2009] Gonilho Pereira. C, Castro-Gomez. J, de Oliveira L.P. « *Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete*», Construction and Building Materials. 23, pp 602-608. 2009.

[George Wang 2010] George. Wang, Yuhong .Wang, Zhili .Gao., « *Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria*», Journal of Hazardous Materials. 184, pp 555–560. 2010.

H

[Huan 1985] Huang .C.Y, Feldman. R.F., « *Hydration reactions in Portland cement–silica fume blends*», Cem Concr Res, 15, pp585. 1985.

[Hinrichs 1989] Hinrichs .N, Older. I., « *Investigation of the hydration of Portland blast furnace slag cement: hydration kinetics*». Advances in Cement Research, 2(5), pp 9-13. 1989.

[Hager 2004] Hager. I., « *Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques*», Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.

[Hu 2008] Hu. S.G, Wang. H.X, Zhang. G.Z, Ding. Q.J, « *Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag*», Cem Concr Compos, vol 30, pp 239-44, 2008.

J

[Juan 2006] Juan. M, Manso, Juan. A. Polanco, Milagros. L, Javier. J. Gonza'lez , « *Durability of concrete made with EAF slag as aggregate*», Cement & Concrete Composites ,28 , pp 528-534, 2006.

K

[Klur 1996] Klur. I., « *Etude par RMN de la structure des silicates de calcium hydratés*», Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 1996.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Kılıc 2008] Kılıc. A, Atis. C.D, Teymen. A, Karahan. O, O' zcan. F, Bilim. C, O' zdemir. M, «*The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete*», Cement & Concrete Composites, vol 30, pp 290-296, 2008.

[Kolani 2012] Kolani. B., « *Comportement au jeune âge des structures en béton armé à base de liants composés aux laitiers* ». Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France, 2012.

[Khan 2014] Khan. S.U, Nuruddin. M.F, Ayub. T, Shafiq. N., « *Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete* ». The Scientific World Journal, 1–11, 2014.

[KAÏKEA 2015] Kaikea. A., «*élaboration des bétons à hautes performances fibrés avec addition du laitier granulé comportement mécanique et durabilité*». Thèse de doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 2015.

L

[Ladaoui 2010] Ladaoui. W., « *Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs* ». Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France, 2010.

[Lykoudis 2010] Lykoudis. S, Liapis. I, Egnatia. Odos, « the 670 km project and EAF slag», In: Ferrous slag – resource development for an environmentally sustainable world, Proceedings of the 6th European slag conference, EUROSLAG Publication No. 5, Madrid, Spain, p. 335–46, 2010

[Lakhal 2011] Lakhal. R., « *Elaboration des bétons à hautes performances à base des sous-produit locaux, formulation et caractérisation physico-mécanique* ». Mémoire de Magistère Université d'Annaba, 2011.

M

[Maso 1969] Maso. J.C., « *Nature minéralogique des agrégats facteur essentiel de la résistance des bétons et l'action du gel*». Thesis, Toulouse, 1969.

[Maso 1980] Maso. J.C., « *La liaison entre les granulats et pâte de ciment hydratée* ». 7ème Congrès International de Chimie des Ciment, Vol 1, Paris, France, pp. 3-14.1980.

[Maso 1982] Maso. J.C., *La liaison pâte-granulats*, in « Le béton hydraulique », Paris, Presse de l'ENPC, 1982.

[Malier 1992] Malier. Y. « *Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications* ». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 674p. 1992.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Maslehuddin 2003] Maslehuddin . M, Sharif .A.M, Shameem. M, Ibrahim. M, Barry .M.S, «*Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes*», Construct Build Mater, 17, pp 105–12, 2003.

[Meno 2004] Menou. A., «*Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multi-échelles de l'endommagement thermique* », Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.

[Manso2004] Manso. J.M, Gonzalez. J.J, Polanco. J.A, «*Electric arc furnace slag in concrete*», J Mater Civil Eng, vol 16, pp 639–45, 2004.

[Manso 2006] Manso. J.M, Polanco. J.A, Losañez. M, González. J.J, «*Durability of concrete made with EAF slag as aggregate*», Cem Concr Compos, 28, pp 528–34, 2006.

[Mauthoor 2016] Mauthoor .S, Mohee. R, Kowlessar .P, «*Characterization of electric arc furnace slags as concrete aggregate in a small island developing state: A preliminary study* », Construction and Building Materials, vol 105, pp 459-464, 2016.

N

[Nichols 1982] Nichols F.P «*Manufactured sand and crushed stone in Portland cement concrete*». Concrete International, 4, pp 56-63. 1982.

[Neville 2000] Neville A.M. *Propriété des bétons*, Eyrolles, Paris, France, p 806, 2000.

[NA 442. 2005] Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 2005.

[NF EN 15167-1 2006] Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité, 2006.

[NF EN 13263-1 2009] Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité, 2009.

[NF EN 197-1 2012] Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. AFNOR, La Plaine Saint-Denis, France (in French).Cement - Part 1, 2012.

[NF EN 934-2 2012] Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, 2012.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[NF EN 1008 2003] Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Juillet 2003.

[NF EN 12390-1 2001] Essai pour béton durci, Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux Moules, Indice de classement P 18-430, AFNOR, octobre 2001.

[NF EN 12390-2 2001] Essai pour béton durci, Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Indice de classement P 18-438, AFNOR, octobre 2001.

[NF EN 12350-6 2012] Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique. 2012.

[NF EN 12350-2 1999] Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement. AFNOR, décembre 1999.

[Newman 2003] Newman. J. B., « *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials* », Butterworth-Heinemann, 2003.

[NF EN 933-1 1997] Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, 1997.

[NGUYEN 2013] NGUYEN T. D., « *Etude de la zone d'interphase « granulats calcaires poreux –pâte de ciment* », Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.2013.

P

[Powers 1968] Powers .T.C. « *The thermodynamics of volume change and creep*», Materials and Structures, Research and testing (Paris), Vol 1, pp 487-507. 1968.

[Parrott 1969] Parrott .L.J., «*The selection of constituent and proportions for proceeding workable concrete with compressive cube strength of 80 to 110 N/mm², cement and concrete association, pp 12 technical report 416, 1969.*

[Persson 1992a] Persson. B., « *Hydration, Structure, and Strength of High Performance Concrete. Data and Estimations*». Report TVBM-7011. LTH Building Materials: Lund, Sweden. 1992 .

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Persson 1992b] Persson .B., « Hydration, Structure, and Strength of High Performance Concrete, Licentiate Thesis». Report TVBM-1009. LTH Building Materials: Lund, Sweden. 1992.

[Persson 1998] Persson. B., «Seven-year study on the effect of silica fume in concrete», Advn. Cem. Based Mater, pp 139-155. 1998.

[Poitevin 1999] Poitevin. P, « *Limestone aggregate concrete, usefulness and durability*», Cement and Concrete Composites, vol 21, pp 89-97, 1999.

[Park 2005] Park. C.K, Noh. M.H, Park .T.H., «*Rheological properties of Cementitious materials containing mineral admixtures*», Cement and Concrete Research, 35, pp 842-849. 2005.

[Papayianni 2010] Papayianni. I, Anastasiou .E, «*Utilization of electric arc furnace steel slags in concrete products*», In: Ferrous slag – resource development for an environmentally sustainable world, Proceedings of the 6th European slag conference, EUROSLAG Publication No. 5, Madrid, Spain, p. 319–34, 2010.

[Pellegrino 2013] Pellegrino .C, Cavagnis. P, Faleschini. F, Brunelli. K, «*Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate*», Cem Concr Compos, vol 37,pp 232–40, 2013.

[Peng2010] Peng. Y.Z, Hu. S.G, Ding. Q.J« *Preparation of reactive powder concrete using fly ash and steel slag powder*» J Wuhan Univ Technol, vol 25, pp 349-54, 2010.

Q

[Qasrawi 2009] Qasrawi. H, Shalabi. F, Asi. I, « *Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate*», Constr Build Mater, vol 23, pp 1118-25, 2009.

[Qiang 2012] Qiang. W, Peiyu .Y, Guidong. Mi , « *Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement* » ,Construction and Building Materials , vol 35, pp 8-14, 2012.

R

[Rafat 2011] Rafat. S, «*Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*», Resources, Conservation and Recycling, vol 55, pp 923– 932, 2011.

S

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[Stock 1979] Stock. A.F, Hannat. D.J, Williams. R.I.T., «*The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete*»; Magazine of Concrete Research, Vol. 31, pp 225-234, 1979.

[Shi 1998] Shi .T.Y, Tanigawa .Y, Mori. H, Kurokawa. Y., « *A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste*». Transactions of the Japan Concrete Institute, vol 20, pp 9-14, 1998.

[Shi 2000] Shi .C.J, Qian. J.S, « *High performance cementing materials from industrial slags – a review*», Resour Conserv Recy , vol 29, pp 195-207, 2000.

[Shi 2002] Shi.C, Wu. Y, Shao .Y, Riefler. M, «*Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete*», First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp 349-354, 12-13 November 2002.

[Sun 2003] Sun. J.Y, «*Study of Effects of Ground Steel Slag on Mechanical Performance and Soundness of Concrete*», Coal Ash China, vol 5, pp 7-9, 2003.

[Shi 2004] Shi. C.J, « *Steel slag—its production, processing, characteristics, and Cementitious Properties* », J Mater Civil Eng, vol 16, pp 230-6, 2004.

[Sobolev 2005] Sobolev. K., « *Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag* » Cement and Concrete Composites Vol 27, Issues 7–8, August–September, Pages 848–853; 2005.

[Samir 2012] Samir. I, Abu-Eishah. a, Amr .S. El-Dieb. b, Mostafa. S. Bedir. C, «*Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region*», Construction and Building Materials, vol 34, pp 249–256, 2012.

[Samir 2012] Samir .I, Abu-Eishah. a, Amr. S. El-Dieb .b, Mostafa. S. Bedir. C, « *Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region* », Construction and Building Materials 34, pp 249–256, 2012.

V

[Viallis-Terrisse 2000] Viallis-Terrisse, H., «*Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles*», Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.2000.

[Vejmelkov 2009] Vejmelkov, E., « *High performance concrete containing lower slag amount: A complex*», Construction and Building Materials, pp 2237–2245, 2009.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

W

[Wu 1999] Wu. X.Q, Zhu. H, Hou. X.K, Li, « *H Study on steel slag and fly ash composite Portland*», cement. Cem Concr Res, vol 29, pp 1103-6, 1999.

[Wu 2007] Wu .S.P, Xue .Y.J, Ye. Q.S, Chen .Y.C, «*Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures* », Build Environ, vol 42, pp 2580-5, 2007.

[Wang 2011] Wang. Q, Yan. P.Y, Feng. J.W, «*A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions*». J Hazard Mater, vol 186, pp 1070-5, 2011.

Y

[Yasar 2003] Yasar. E, Atis. C.D, Kılıc. A, Gülsen .H, «*Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash*», Mater Lett, pp 2267-2270, 2003.

Z

[Zaina 2000]. Zaina. M.F.M, Safiuddina. Md, Mahmud. H.,« *Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water± binder ratios*», Cement and Concrete Research, pp 1501±1505, 2000.

ANNAXES

Annexes – A: Fiches techniques

Construction

Notice produit
Edition 05/ 2010
Numéro 2.11
Version n°2010.087
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 834-2 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 acrylique.						
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. <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;">  <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: #FFD700;"> <th style="padding: 2px;">RHÉOLOGIE</th> <th style="padding: 2px;">RÉSISTANCES INITIALES</th> <th style="padding: 2px;">SÉGRÉGATION D'EAU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr style="background-color: #FF0000; color: white;"> <td style="padding: 2px;">5</td> <td style="padding: 2px;">3</td> <td style="padding: 2px;">4</td> </tr> </tbody> </table> </div>	RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	SÉGRÉGATION D'EAU	5	3	4
RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	SÉGRÉGATION D'EAU					
5	3	4					
Caractéristiques							
Aspect	Liquide brun clair						
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac 						
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.						
Conservation	1 an en emballage intact						
Données techniques							
densité	1,06 ± 0,01						
pH	4,5 à 5,5						
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %						
Extrait sec	28,0 à 31,0 %						



1

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12 v2

ANNEXES

Construction	Teneur en ions Cl	≤ 0,1 %
	Conditions d'application	
	Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
	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	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel</p> <p>Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.</p> <p>- 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 matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute 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 fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.</p>	



SIKA® France S.A.
34, rue Edouard Vaillant - BP 104
93351 La Bourget Cedex
France

Tel : 01 49 32 80 00
Fax : 01 49 32 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensac
92571 Saint Denis La Plaine cedex
France

ANNEXES

Annexe – B : Abaque – Tension et durée de l'essai en fonction de l'intensité initiale I_{30V} pour la méthode NT BUILD 492

NT BUILD 492 8
APPENDIX 2

Table 1. Test voltage and duration for concrete specimen with normal binder content.

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Note: For specimens with a special binder content, such as repair mortars or grouts, correct the measured current by multiplying by a factor (approximately equal to the ratio of normal binder content to actual binder content) in order to be able to use the above table.