

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة زيان عاشور - الجلفة
Ziane Achour University of Djelfa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Science and Technology

Department : Civil Engineering

Order N° : / 2022

Defense authorization N° :/2022

DOCTORAL THESIS

Doctor of Sciences

Presented by

Laid GUERMITI

With a view to obtaining the doctoral diploma in Doctor of Sciences

Branch: Civil Engineering

Specialty: Construction materials

Topic

Study of a fluid high performance concrete reinforced with fibers

Supported, on 08/12 / 2022, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Fodil DIF	MCA	University of Djelfa	President
Mrs Dalila BENAMARA	Professor	University of Djelfa	Supervisor
Mr Mohamed GUENDOZ	MCA	University of Médéa	Co Supervisor
Miss Djamila BOUKHELKHAL	MCA	University of Médéa	Examiner
Mr Aboubakeur BOUKHELKHAL	MCA	University of Laghouat	Examiner
Mr Rebih ZAITRI	MCA	University of Djelfa	Examiner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة زيان عاشور - الجلفة

Université Ziane Achour - Djelfa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Génie Civil

N° d'Ordre : / 2022

Autorisation de Soutenance N°/2022

THESE DE DOCTORAT

Doctorat en sciences

Présentée par

Laid GUERMITI

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en *sciences*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux de construction

Thème

Étude d'un béton à haute performance fluide renforcé par des fibres

Soutenue publiquement, le 08 /12 /2022, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Fodil DIF	MCA	Université de Djelfa	Président
Mme Dalila BENAMARA	Professeur	Université de Djelfa	Directrice de thèse
Mr Mohamed GUENDOuz	MCA	Université de Médéa	Co Directeur de thèse
Melle Djamila BOUKHELKHAL	MCA	Université de Médéa	Examinatrice
Mr Aboubakeur BOUKHELKHAL	MCA	Université de Laghouat	Examineur
Mr Rebih ZAITRI	MCA	Université de Djelfa	Examineur

Dédicaces

&

Remerciements

A *Mes parents*

Mes frères et sœurs

Mon épouse et mes enfants.

*En premier lieu je remercie profondément **ALLAH**, qui m'a donné la force, le courage et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance à ma Directrice de Thèse Pr **BENAMARA Dalila**, professeur à l'université de Z. A. Djelfa. Je lui adresse mes plus vifs remerciements pour l'aide et l'attention qu'elle a porté à ce travail.*

*J'ai eu le plaisir de travailler avec mon co-encadrant de la thèse, Mr. **Mohamed GUENDOUZ**, Maître de Conférences à l'Université de Y.F. Médéa. Ce fut non seulement très utile pour assurer la continuité des travaux mais également très agréable en raison de leur disponibilité et de leur patience.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ceux qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail, à savoir Mr ; **DIF Fodil** Président de jury qui ont accepté de rapporter sur cette thèse et Melle **Djamila BOUKHEKHAL**, **Aboubakeur BOUKHELKHAL**, et **Rebih ZAITRI** qui ont accepté aussi d'examiner ce travail.*

*Mes remerciements vont également au directeur et personnels du laboratoire **LNHC** unité de Djelfa particulièrement à Mr **Mounir** pour m'avoir facilité la réalisation des essais d'écrasement.*

*Je tiens à remercier Mr **Djilali Boulerbaa** ingénieur au plateau techniques en analyses physico-chimiques (**PTAPC-Laghouat**) pour son aide à effectuer les analyses par **DRX, MEB, ATG, et ATD**.*

A toute ma famille et à tous mes collègues du département de Génie Civil de l'Université de Z.A, Djelfa, je dirai merci pour les encouragements et le soutien dont ils n'ont cessé de me donner.

RÉSUMÉS

Résumé

Le coulage des bétons plastiques ou très plastiques dans un milieu confiné est assez difficile, qui nécessite une vibration, une amélioration de formulation de la matrice et parfois un changement de la morphologie de ses constituants (limiter la taille maximale des gros granulats). L'objectif de cette étude est de reformuler ce type de béton afin d'atteindre les caractéristiques visées (béton fluide ou très fluide). Dans ce contexte nous avons contribué à l'amélioration du caractère maniabilité par l'addition progressive de superplastifiant (SP) jusqu'à atteindre la fluidité souhaitée, avec un renforcement de ces constituants par l'ajout des fibres métalliques (FM) afin de garder les mêmes propriétés mécaniques de la matrice de référence.

L'approche des plans d'expériences a été utilisée dans le programme expérimental de cette étude afin d'optimiser des bétons à hautes performances fluides et fibrés (BHPFF), dans laquelle un plan composite centré à 2 facteurs a été utilisé pour modéliser l'influence du pourcentage en SP et le dosage de FM sur les propriétés du béton fluide à haute performance. Le logiciel d'analyse statistique Design-Expert version-7, a été utilisé pour le développement des modèles mathématiques reliant l'effet des variations de ces paramètres sur la fluidité et la résistance mécanique à la compression et en flexion des BHPFF, et expliquer au mieux les résultats expérimentaux.

Les résultats expérimentaux ont montré que la fluidité des BHPF s'améliore en fonction de l'augmentation du pourcentage de SP et diminue légèrement en fonction du dosage en FM. Pour les mélanges étudiés le dosage en SP et la quantité de fibres métalliques varient respectivement entre 1,80% et 2,4%, et 23 kg/m³ à 37 kg/m³. L'ajout des fibres métalliques améliore les propriétés mécaniques des BHPF, notamment en flexion avec un comportement plus ductile. Le diamètre d'étalement de tous les mélanges variait entre 400 mm et 580 mm, indiquant une bonne fluidité et mobilité. Tandis que, la résistance à la compression et à la flexion variait respectivement de 82 à 97 MPa et de 4,5 à 7,53 MPa,

De plus, l'étude numérique a montré qu'on peut fabriquer des BHPFF en appliquant la méthode des plans d'expérience par l'optimisation du dosage en superplastifiant et de la teneur en fibres métalliques. Les résultats d'optimisation indiquent qu'avec 30 kg/m³ de FM et 2,4 % de superplastifiant, la résistance maximale à la compression et à la flexion à 28 jours est obtenue, tout en respectant les recommandations d'ouvrabilité d'EFNARC.

Mots clés : Béton à haute performance fluide, Fibres, Rhéologie, Comportements mécaniques, ATG/ATD.

الملخص

صب الخرسانة الطازجة ذات قوام لدن في الأماكن أو العناصر الهيكلية التي بها حديد التسليح كثيف ، صعب جدا. أين يتطلب عملية الهز ، أو التحسين في إعادة صياغتها ، أو في بعض الأحيان تغيير في حجم مكوناتها خاصة الركام (ضبط قطر الركام).

الهدف من هذه الدراسة هو إعادة صياغة هذا النوع من الخرسانة من أجل تحقيق الخصائص المستهدفة (خرسانة مرنة أو ذات سيولة عالية). في هذا السياق ، قمنا بتحسين خاصية قابلية التشغيل من خلال الإضافة التدريجية للملدن الفائق (SP) الى غاية الحصول على السيولة المرغوبة. وللحفاظ على نفس الخصائص الميكانيكية للخرسانة المرجعية (الشاهد) قمنا بإضافة ألياف فولاذية للخليط.

تم استخدام نهج مقارنة تصميم التجارب في البرنامج التجريبي لهذه الدراسة بغية تحسين أداء الخرسانة عالية الأداء السائلة والخرسانة المعززة بالألياف (BHPFF) ، حيث تم استخدام تصميم مركب ثنائي العامل لنمذجة تأثير نسبة الملدن (SP) مع كمية الألياف (FM) على خصائص الخرسانة السائلة عالية الأداء. تم استخدام برنامج التحليل الإحصائي Design-Expert version-7 (الإصدار 7) لتطوير نماذج رياضية تتعلق بتأثير الاختلافات في هذه العناصر على السيولة والمقاومة الميكانيكية للضغط والانحناء لـ BHPFFC ، ولشرح أفضل النتائج التجريبية.

أظهرت النتائج التجريبية أن سيولة BHPF تتحسن بزيادة نسبة الملدن (SP) وتتنخفض قليلاً بإضافة (FM). بالنسبة للخلانط المدروسة ، تتراوح جرعة SP وكمية الألياف المعدنية FM بين 1.80% و 2.4% ، و 23 كجم / م³ إلى 37 كجم / م³ ، على التوالي. تبين هذه النتائج أيضاً أن إضافة الألياف المعدنية تلعب دوراً هاماً في تحسين الخواص الميكانيكية لمركبات BHPFs ، خاصة في الانحناء بسلوك أكثر مرونة. تتراوح قطر الانتشار لجميع الخلانط بين 400 مم و 580 مم ، مما يشير إلى قابلية جيدة لسيولة وحركة الخرسانة. بينما تراوحت قوة الانضغاط والانحناء من 82 إلى 97 ميجا باسكال و 4.5 إلى 7.53 ميجا باسكال على التوالي.

إضافة إلى ذلك ، أظهرت الدراسة الرقمية أنه يمكن تصنيع BHPFF بتطبيق طريقة التصميم التجريبي من خلال تحسين جرعة الملدن الفائق ومحتوى الألياف المعدنية. تشير نتائج التحسين إلى أنه مع 30 كجم/م³ من FM و 2.4% من الملدن الفائق ، يتم الحصول على أقصى مقاومة للضغط والانحناء في 28 يوماً ، مع مراعاة توصيات EFNARC.

الكلمات المفتاحية : خرسانة عالية الأداء سائلة، ألياف، ريولوجية، سلوك ميكانيكي، تحليل وزني حراري/تحليل تفاضلي حراري.

Abstract

Pouring of plastic or very plastic concrete in confined structural elements where steel reinforcement is dense is quite difficult, requiring vibration, or improvement in the formulation of the matrix and sometimes a change in the morphology of its constituents (limit the maximum size of large aggregates). The objective of this study is to reformulate this type of concrete in order to achieve the targeted characteristics (fluid or very fluid concrete). In this context we have contributed to the improvement of the workability character by the progressive addition of superplasticizer (SP) until reaching the desired fluidity, with the reinforcement of these constituents by the addition of metal fibers (FM) in order to keep the same mechanical properties of the reference matrix.

The design of experiments approach was used in the experimental program of this study to optimize high performance fluid fiber-reinforced concretes (HPFFC), in which a two-factor centered composite design was used to model the influence of the SP percentage and the FM dosage on the properties of high-performance fluid concrete. The Design-Expert version-7 statistical analysis software was used also to develop mathematical models relating the effect of variations in these parameters on the fluidity, compressive and flexural strength of the HPFRFC, and to explain the better experimental results.

The experimental results showed an improvement in the fluidity of HPFRFC according to the increase in the SP content and decreases slightly with the increase of MF content. For the mixtures studied, the SP dosage and the metallic fibers content vary between 1.80% and 2.4%, and 23 kg/m³ to 37 kg/m³, respectively. The addition of metallic fibers improves the mechanical properties of HPFRFC, especially in flexural strength with a more ductile behavior. The spread diameter of all mixes ranged between 400 mm and 580 mm, indicating good fluidity and mobility. While, the compressive and flexural strength ranged from 82 to 97 MPa and 4.5 to 7.53 MPa, respectively.

In addition, the numerical study showed that HPFRFC can be produced by applying the experimental design method and optimizing the superplasticizer dosage and the metal fibers content. The optimization results indicate that with 30 kg/m³ of FM and 2.4% of superplasticizer, the maximum 28 days compression and flexural strength were obtained, by meeting the requirement of EFNARC recommendations.

Keys words: *High fluid performance concrete, Fibers, Rheology, Mechanical behavior, ATG/ATD.*

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

Dédicace -----	I
Remerciements -----	II
Résumés -----	III
Table des matières -----	07
Liste des figures -----	12
Liste des tableaux -----	16
Introduction générale -----	18

CHAPITRE I : LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES BHP

I. Les bétons à hautes performances BHP -----	23
I.1. Introduction -----	23
I.2. Béton à haute performance -----	23
I.3. Compositions des BHP -----	24
I.3.1. Choix de ciment -----	24
I.3.2. Les granulats -----	24
I.3.3. L'eau de gâchage -----	26
I.3.4. Les adjuvants -----	26
I.3.5. Les additions minérales -----	28
I.3.6. Les fibres -----	30
I.3.6.1. Les fibres métalliques -----	31
I.3.6.2. Les fibres minérales -----	32
I.3.6.3. Les fibres végétales -----	32
I.3.6.4. Les fibres synthétiques -----	32
I.4. Formulation des BHP -----	33
I.4.1. Méthode de formulation -----	34
I.4.1.1. La méthode de L'Université de Sherbrooke -----	35
I.5. Propriétés des bétons à hautes performances BHP -----	37
I.5.1. A l'état frais -----	37
I.5.1.1. Maniabilité -----	37
I.5.1.2. Contrôle de la masse volumique -----	39
I.5.2. A l'état durci -----	39
I.5.2.1. Comportement en compression -----	39
I.5.2.2. Comportement en traction -----	40
I.5.2.3. Rigidité -----	41
I.5.2.4. Retrait -----	41
I.5.2.5. Fluage -----	43
I.5.2.6. Durabilité -----	44
I.6. Microstructure des BHP -----	44
I.6.1. Peau du béton -----	45
I.6.2. Microstructure interne -----	45
I.6.3. Interface pâte-granulats -----	45
I.7. Classification et Application des BHP -----	46

I.7.1. Exemples d'ouvrages réalisés en BHP	47
I.8. Conclusion	49

CHAPITRE II : LES BETONS FLUIDES A HAUTES PERFORMANCES

II. Les bétons fluides à hautes performances	51
II.1. Introduction	51
II.2. Notions sur les bétons fluides	51
II.3. Comparaison entre un béton ordinaire et un béton fluide	51
II.4. Propriétés des bétons fluides à hautes performances BFHP	52
II.4.1. La fluidité (la capacité au remplissage)	53
II.4.2. Résistance à la ségrégation	54
II.4.3. Capacité de passage	55
II.5. Rhéologie des bétons fluides	55
II.5.1. Rhéomètre	57
II.5.2. Rhéogramme	58
II.5.3. Propriétés rhéologiques	58
II.6. Rhéologie des matériaux cimentaires	59
II.6.1. Facteurs influençant la rhéologie des bétons fluides	61
II.6.1.1. Effet du rapport eau-ciment	61
II.6.1.2. Effet des caractéristiques du ciment	62
II.6.1.3. Effet des additions minérales	63
II.6.1.4. Effet des adjuvants	63
II.6.1.5. Effet des fibres	65
II.6.1.6. Effet du temps	65
II.6.1.7. Effet de la température	66
II.6.1.8. Malaxage	67
II.7. Les avantages des bétons fluides	68
II.8. Conclusion	69

CHAPITRE III : MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

III. Matériaux et méthodes d'essais	71
III.1. Introduction	71
III.2. Matériaux utilisés	71
III.2.1. Gravier	71
III.2.2. Sable	71
III.2.3. Ciment	73
III.2.4. Fumée de silice	74
III.2.5. Adjuvant	75
III.2.6. Eau de gâchage	76
III.2.7. Fibres	76
III.3. Méthode de formulation	77
III.3.1. Introduction	77
III.3.2. Méthodologie expérimentale	78
III.3.3. Optimisation de la formulation du BHPF par une modélisation "plan de surface"	78

III.3.3.1. Choix de plan d'expériences	78
III.3.3.2. Choix de modèle mathématique	79
III.4. Procédures des essais	81
III.4.1. Préparation des bétons	81
III.4.2. Confections des éprouvettes et conditions de conservation	82
III.4.3. Essai sur béton	82
III.4.4. Essais réalisés à l'état frais	82
III.4.4.1. Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS de BHP	83
III.4.4.2. Essai de l'étalement des BHPF	83
III.4.4.3. Essai de la rhéologie	83
III.4.4.4. Masse volumique des BHP à l'état frais	85
III.4.5. Essais sur le béton durci	85
III.4.5.1. Résistance à la compression	85
III.4.5.2. Résistance à la traction par flexion (flexion 3 points)	86
III.4.5.3. Essai de l'absorption capillaire (sportivité)	87
III.4.5.4. Essais d'auscultations dynamiques	88
III.4.5.4.1. Module d'élasticité dynamique	89
III.4.5.4.2. Résistance à la compression	90
III.5. Conclusion	90

CHAPITRE IV : ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

IV. Analyses et discussions des résultats	93
IV.1. Résultats des essais sur les BHP	93
IV.2. Modèles mathématiques	94
IV.3. Interprétation des résultats à l'état frais	95
IV.3.1. Essai de l'étalement	95
IV.3.2. L'effet de superplastifiant sur le comportement rhéologique de BHP	97
IV.3.3. La masse volumique des BHP à l'état frais	99
IV. 4. Interprétation des résultats à l'état durci	99
IV.4.1. La résistance à la compression	99
IV.4.2. La résistance à la traction par flexion (flexion 3 points)	102
IV.4.3. L'absorption capillaire (sportivité)	105
IV.4.4. Essais d'auscultations dynamiques	106
IV.4.4.1. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques	107
IV.4.4.2. Module d'élasticité dynamique E_d	107
IV.5. Microstructure interne de BHP	109
IV.5.1. Caractérisation chimique (analyse microstructurale)	109
IV.5.2. Microscope électronique à balayage (MEB)	110
IV.6. Analyse thermique	111
IV.6.1. Analyse ATG-ATD	111
IV.7. Conclusion	115
Conclusion générale & perspectives	117
Références bibliographiques	120
ANNEXES	133

Annexe A : Fiche technique du ciment -----	134
Annexe B : Fiche technique de la fumée de silice -----	136
Annexe C : Fiche technique de l'adjuvant -----	138
Annexe D : Fiche technique de fibres utilisées -----	139
Annexe E : Logiciel de modélisation (Expert Design) -----	141
Annexe F : Formulation de béton selon la méthode (Sherbrooke) -----	142
Annexe G : Préparation et conservation des éprouvettes -----	144
Annexe H : Publication-----	145

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure I.1. Représentation schématique de la microstructure d'une pâte de ciment frais et durcie avec deux rapports E/C de 0.65 et 0.25	23
Figure I.2. Dispersion des grains de ciment par l'ajout du polymère	27
Figure I.3. Mode d'action d'une molécule de superplastifiant	27
Figure I.4. Différente forme des fibres d'acier	31
Figure I.5. Organigramme de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP	35
Figure I.6. Relation proposée entre le rapport 'E/L' et la résistance à la compression	36
Figure I.7. Détermination du dosage en eau	36
Figure I.8. Dosage en gros granulat	37
Figure I.9. L'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre et l'affaissement au cône d'Abrams du béton THP pendant l'heure qui suit le coulage (essai à 20C°)	38
Figure I.10. Béton ordinaires : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier	39
Figure I.11. Béton à haute performance : les granulats sont également fissurés	39
Figure I.12. Diagramme contraintes - déformation	40
Figure I.13. Retrait endogène à 3-4 ans en fonction de l'humidité relative interne	42
Figure I.14. Retrait endogène après 600 jours pour des granulats calcaires et silicocalcaires (Sicard, 1993), c=ciment, s=fumée de silice	43
Figure I.15. Évolution du fluage des différents bétons [56]	44
Figure I.16. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat : a) béton sans fumée de silice ; les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientés perpendiculairement aux granulats, b) béton avec fumée de silice, absence de la zone de transition, homogénéité du gel CSH [62]	46
Figure I.17. Lake Point Tower [63] & River Plaza [64]	47
Figure I.18. Tunnels de Villejust & Tunnel sous la manche	48
Figure I.19. Les ponts de l'île Rousski [66] & l'île de Ré	48
Figure II.1. Relation entre capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton.....	53
Figure II.2. Variation de la capacité de remplissage en fonction de la teneur en gros granulats, pour différents rapport sable sur pate	54
Figure II.3. Formation d'arches pouvant bloquer l'écoulement du béton	55
Figure II.4. Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement en fonction des fines calcaires ---	56
Figure II.5. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement	57
Figure II.6. Types de rhéomètres à béton	57

Figure II.7. Déformation d'un fluide sous l'effet d'une force F	58
Figure II.8. Allures des rhéogrammes types (a) : Newtonien, Binghamien et (b) : Herschel-Bulkley	59
Figure II.9. Rhéogrammes de BAP et BHP	60
Figure II.10. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons	61
Figure II.11. Effet du rapport e/c sur le seuil de cisaillement de différents mortiers.....	62
Figure II.12. Effet du rapport e/c sur la viscosité plastique de différents mortiers.....	62
Figure II.13. Rhéogramme illustrant l'influence de SP sur les propriétés rhéologiques des bétons-	63
Figure II.14. Variation du Seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction du temps confectionnée avec différents types de superplastifiant	64
Figure II.15. Effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques	64
Figure II.16. Propriétés rhéologiques : viscosité plastique (a) et seuil de cisaillement (b) des bétons fibrés avec et sans adjuvant en fonction de dosage en fibre	65
Figure II.17. Influence de la température sur l'évolution du seuil de cisaillement	66
Figure II.18. Propriétés rhéologiques : seuil de cisaillement (a) et viscosité plastique (b) pour différentes pates de ciments en fonction la température	67
Figure II.19. Surfaces et courbes iso-réponses de viscosité plastique en fonction de la température et du dosage en agent de viscosité	67
Figure III.1. Courbes granulométriques des granulats	72
Figure III.2. Analyse par DRX du sable	72
Figure III.3. Diagramme de DRX appliqué sur le CEM I 42.5R	74
Figure III.4. Diagramme de DRX appliqué sur la fumé de silice	75
Figure III.5. Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW RE25	75
Figure III.6. Fibres métalliques DRAMIX	77
Figure III.7. Conception composite centrale (CCD) pour deux variables	79
Figure III.8. Image du malaxeur de béton utilisé	81
Figure III.9. Mesure de la consistance	83
Figure III.10. Dispositif du rhéomètre utilisé	84
Figure III.11. Profil de vitesse	84
Figure III.12. Schématisation du dispositif de compression	85
Figure III.13. Schématisation du dispositif de flexion 3 points	87
Figure III.14. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire (Sorptivité)	88
Figure III.15. Appareil d'Auscultation dynamique (ultra sonique)	88
Figure IV.1. Adéquation entre les valeurs de l'étalement mesurées et prédites	95

Figure IV.2. Surfaces et courbes iso-réponse de l'étalement (cm) en fonction de % de SP et le dosage en FM -----	96
Figure IV.3. Graphique de perturbation pour l'étalement -----	97
Figure IV.4. Exemple de rhéogramme obtenu avec le rhéomètre Heidolph-RZR 2102 Control Z --	98
Figure IV.5. Variation de la masse volumique pour différents types du BHP à l'état frais -----	99
Figure IV.6. Adéquation entre les valeurs de résistance en compression mesurées et prédites-----	100
Figure IV.7. Surfaces et courbes iso-réponse de résistance en compression (MPa) à 28 jours, en fonction de % de SP et le dosage en FM -----	100
Figure IV.8. Destruction finale des éprouvettes (10x10x10) cm ³ par la compression-----	102
Figure IV.9. Graphique de perturbation de résistance en compression à 28 jours -----	102
Figure IV.10. Adéquation entre les valeurs de résistance en flexion mesurées et prédites -----	103
Figure IV.11. Surfaces et courbes iso-réponse de résistance en flexion (MPa) à 28 jours, en fonction de % de SP et le dosage en FM -----	103
Figure IV.12. Destruction finale des éprouvettes (7x7x28) cm ³ par la flexion -----	104
Figure IV.13. Graphique de perturbation de résistance en flexion à 28 jours -----	105
Figure IV.14. Coefficient de sorptivité S des différents du BHP à 28 jours -----	105
Figure IV.15. Evolution de la vitesse de propagation du son à 28 jours pour différents BHP -----	107
Figure IV.16. Evolution du module d'élasticité dynamique E _d à 28 jours pour différents BHP-----	108
Figure IV.17. Résistances comparatives (ultrason & par presse de compression) -----	108
Figure IV.18. Analyses DRX du BHPPF6 -----	109
Figure IV.19. Le microscope électronique à balayage utilisé -----	110
Figure IV.20. Observation au MEB des bétons BHPT et BHPPF6 -----	111
Figure IV.21. Appareil de l'analyse ATG / ATD -----	112
Figure IV.22. Analyse thermique thermogravimétrique (ATG) du BHPT -----	113
Figure IV.23. Analyse thermique différentielle (ATD) du BHPT -----	113
Figure IV.24. Analyse thermique thermogravimétrique (ATG) du BHPPF6 -----	114
Figure IV.25. Analyse thermique différentielle (ATD) du BHPPF6 -----	114

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées -----	33
Tableau I.2. Composition d'un béton THP en kg/m ³ -----	38
Tableau I.3. Le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel -----	41
Tableau I.4. Différences essentielles entre le retrait d'un béton ordinaire et celui d'un BHP -----	42
Tableau I.5. Classification des bétons à hautes performances -----	46
Tableau II.1. Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de Matériau	61
Tableau III.1. Propriétés du gravier utilisé -----	71
Tableau III.2. Propriétés du sable utilisé -----	73
Tableau III.3. Propriétés physico-mécaniques du ciment -----	73
Tableau III.4. Composition chimiques du ciment -----	73
Tableau III.5. Composition minéralogique du ciment -----	73
Tableau III.6. Composition chimiques de la fumée de silice -----	74
Tableau III.7. Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW RE25 -----	76
Tableau III.8. Analyse minéralogiques de l'eau de gâchage -----	76
Tableau III.9. Caractéristiques de fibres utilisées -----	77
Tableau III.10. Formulation de base pour le béton à haute performance témoin BHPT -----	78
Tableau III.11. Tableau des facteurs ou des paramètres à cinq (05) niveaux -----	80
Tableau III.12. Compositions issues du plan d'expérience -----	80
Tableau III.12. Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions -----	89
Tableau IV.1. Caractéristiques issus du plan d'expériences pour différents BHP -----	93
Tableau IV.2. Analyse de variance (ANOVA) pour toutes les réponses -----	94
Tableau IV.3. Paramètres statistiques de (ANOVA) pour toutes les réponses -----	95
Tableau IV.4. Propriétés rhéologiques des bétons BHP -----	98
Tableau IV.5. Résultats de la masse volumique de béton frais pour différents type du BHP-----	99
Tableau IV.6. Résultats d'essai d'auscultation dynamique pour différents types de béton-----	106

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

✓ Mise en contexte et problématique

Le béton à haute performance BHP, parmi les matériaux le plus utilisé dans tous les domaines de construction modernes. Présente une micro-texture faible en porosité et très dense. Plusieurs caractéristiques principales des bétons ont été améliorées tel que la résistance, module d'élasticité, fluage, perméabilité. Ce béton se développent actuellement dans tout le monde et semblent être amenés à remplacer les bétons classiques dans de nombreuses applications.

Les BHP sont des bétons de consistances fermes, plastiques, parfois très plastiques. L'écoulement dans les zones fortement ferrailés reste l'handicape major de ces matériaux, qui doit être atteint dans tous les coins d'un coffrage au moyen de son poids propre et sans vibration. Les caractéristiques des granulats et les proportions de mélange pour ce type de béton ont été affinées par l'expérimentation pour atteindre la fluidité nécessaire. La capacité de remplissage caractérise la maniabilité et la fluidité du béton. Elle dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation.

Le recours aux bétons fluides a été la voie adoptée, la recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton, il convient en diminuer cette porosité, soit en agissant sur la granulométrie en ajoutant des particules ultrafines, (soit en ajoutant un adjuvant de type superplastifiant, soit le plus fréquemment les deux).

La présente étude porte sur l'utilisation d'un béton à haute performance fluide renforcé par des fibres métalliques BHPFF qui présentent de multiples avantages lorsqu'il est utilisé dans des zones à densité d'armature élevée, est un nouveau béton exceptionnel tant en termes de fluidité et de comportement mécanique. Une maniabilité attendue est acceptable pour quelques ouvrages, il se situe entre le béton traditionnel et le béton autoplaçant. Il est facile à mettre en œuvre et utilisé aussi bien pour les applications horizontales (pré-dalles, dallages, planchers) que verticales (voiles, poteaux). (Avec une résistance à la compression est supérieure à 50 MPa pour un âge de 28 jours, et un rapport E/C inférieur à 0.4). L'emploi ce type des bétons dans les structures d'ouvrages d'art reste pourtant indissociable du renforcement par des armatures d'aciers. Une ductilité élevée du matériau du BHP peut être obtenue par le choix du type et de la taille d'agrégat, ou l'utilisation de fibres. (C'est à dire permet de réaliser des structures sollicitées par des contraintes élevées tels que les ouvrages d'art).

L'ajout de fibres au béton à haute performance donne une résistance résiduelle significative après fissuration, augmente la ductilité et améliore la durabilité. Ces propriétés dépendent de nombreux facteurs, dont le rapport d'aspect (longueur de fibre/diamètre équivalent), le pourcentage volumétrique des fibres ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques.

Pour réaliser les compositions de notre mélange, l'analyse statistique, l'optimisation de pourcentage de superplastifiant SP et de la quantité de fibres métalliques FM, une nouvelle technique appelée la méthode des surfaces de réponses (MSR) a pour but d'explorer les relations entre les variables contrôlées (Facteurs), soient le % de SP, et le dosage en FM avec leurs effets sur les réponses visées tel que l'étalement, la résistance à la compression, et la résistance en flexion. Pour ce faire, une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour évaluer la signification des modèles développés par le MSR et leurs coefficients de corrélation R^2 . Nous avons montré que nos résultats expérimentaux sont bien corrélés avec les modèles théoriques pour toutes les réponses choisies.

Grace à ces résultats expérimentaux, ces bétons permettent de concevoir et de réaliser des pièces d'ouvrage d'art très minces, élancés, légères et encore plus durables que les bétons ordinaires. La réduction considérable de l'épaisseur des structures permet un gain économique important.

✓ Objectifs de l'étude

Notre thèse est organisée en quatre chapitres :

- ✎ **Le premier chapitre** est consacré au béton à haute performance (BHP) dans sa globalité en présentant les différents matériaux qui le composent, principe de formulation, différents propriétés et quelques applications.
- ✎ **Le deuxième chapitre** donne une revue bibliographique sur les principales propriétés des bétons fluides à hautes performances et les notions de base du comportement rhéologique. On présente un rappel théorique sur la rhéologie en général et les paramètres rhéologiques concernant les différents types de comportement d'un matériau fluide ainsi que les effets des constituants sur la rhéologie de ciment et du béton.
- ✎ **Dans le troisième chapitre** on traitera les différentes caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection de notre composite, ainsi la formulation et le choix de plan d'expériences correspond, puis l'ensemble des techniques expérimentales utilisées pour les différents essais de caractérisation de béton.

✎ **Dans le quatrième chapitre** une analyse et discussions de l'ensemble des résultats obtenus. à l'issu d'un programme expérimental résultant de l'application d'un plan composite. A partir de la base de données issue de l'application de ce plan, nous présentons des analyses statistiques permettant de trier l'influence des facteurs étudiés (le pourcentage de (SP), le dosage de fibres (FM), sur la fluidité (étalement), les résistances mécaniques à 28 jours des BHPF préparés.

Tout cela est enfin clôturé par une conclusion générale regroupant une synthèse globale de l'ensemble des résultats trouvés, suivie d'une présentation de quelques recommandations pour de futurs travaux.

CHAPITRE I :

LES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES BHP

I. LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES BHP

I.1. Introduction

Depuis que le matériau « béton » existe, les chercheurs se sont toujours intéressés à l'amélioration de ses performances. Bien que composés des mêmes constituants de base que le béton ordinaire (BO), les bétons à hautes performances (BHP) sont de nouveaux matériaux. Leurs propriétés sont sans aucune mesure avec celles des bétons classiques présents [1].

I.2. Béton à haute performance

L'additif au fascicule 65 A définit les BHP comme présentant une résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{C28}) supérieure à 50 MPa et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40 [2]. Cette augmentation de résistance est due à une structure compacte (dense) du béton obtenu par la minimisation de la porosité. La réduction de la porosité peut être obtenue principalement par la réduction de la quantité d'eau avec un rapport Eau/Liant faible. En réduisant la quantité d'eau, l'ajout de superplastifiant permet d'assurer une ouvrabilité suffisante. D'autres facteurs peuvent être utilisés pour réduire la porosité du béton comme une optimisation du squelette granulométrique ou bien l'addition d'ajout cimentaire plus fin que le ciment afin que ce dernier s'insère dans les pores les plus petits. Aïticin [3] a schématisé la microstructure du ciment à l'état frais et à l'état durci avec un rapport E/C de 0.25 et de 0.65 (Figure I.1) [4].

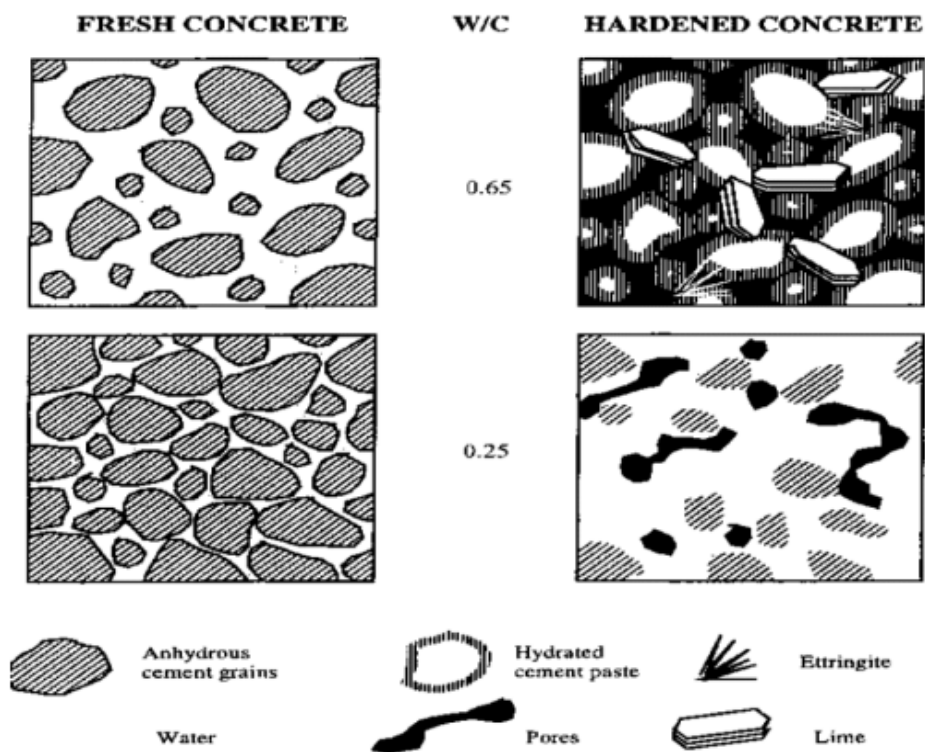


Figure I.1. Représentation schématique de la microstructure d'une pâte de ciment frais et durcie avec deux rapports E/C de 0.65 et 0.25 [3].

I.3. Composition des BHP

Lorsque l'on désire fabriquer un béton à haute performance, il est très important de sélectionner avec soin les différents ingrédients que l'on utilisera. Les BHP se compose de granulats, d'eau, de ciment, de super plastifiant, et éventuellement d'une addition (souvent, des fumées de silice). Un retardateur de prise y est parfois ajouté pour augmenter le temps de mise en œuvre et éventuellement d'une addition. Il ne contient pas de constituants vraiment spécieux ou inhabituels.

I.3.1. Choix de ciment

Pour un béton à haute performance (BHP) plusieurs classes de ciment peuvent être utilisées pour avoir des caractéristiques mécaniques plus importantes. Les ciments les mieux adaptés à la confection de béton à haute performance pour lesquels la résistance doit être élevée, sont les ciments CPA-CEM I des classes 52.5 ou 52.5 R et CPJ-CEM II/A 52.5 ou 52.5 R avec l'emploi de super plastifiant réducteur d'eau [5].

Il est important de noter que la quantité de C-S-H est plus importante dans une pâte de ciment à haute performance (BHP) qu'une pâte de ciment ordinaire (BO) [6].

Les hautes résistances et la durabilité sont la plupart du temps obtenues grâce à une finesse de mouture et une teneur en C3S élevées, un béton contenant peu de portlandite sera en particulier plus stable qu'un béton qui en contiendrait beaucoup [7] et la limitation de la teneur en C3A améliore la résistance aux milieux agressifs [8].

Du point de vue rhéologique, le ciment idéal pour un béton à haute performance devrait ne pas être trop fin (probablement jusqu'à 400 m²/kg déterminé par la méthode de Blaine) [9]. D'après les recherches de (Paillère et al ,1990) [10] et (Boubakir, 1999) [11] ont constaté que le ciment ayant le plus faible pourcentage d'aluminate tricalcite donne la meilleure maniabilité.

I.3.2. Les Granulats

Les granulats occupent environ les trois quarts du volume de béton et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les BHP que dans les bétons classiques. Si on veut fabriquer un béton à haute performance le choix des granulats devient de plus en plus critique au fur et à mesure que ces granulats répondus aux critères dans la forme de surface, la dimension maximale, la porosité, la résistance mécanique, et enfin la minéralogie [12].

Plusieurs études ont montré que les granulats ont des influences claires sur les performances du béton selon leurs qualités, leurs formes et leurs tailles (dimensions) et aussi le volume qu'ils occupent [13,14]. Le choix des granulats devient de plus en plus critique au fur à mesure que la

résistance visée augmente, puisque, les granulats peuvent être le chaînon le plus faible où va s'initier la rupture du béton lorsqu'il sera soumis aux contraintes élevées.

Les granulats doivent avoir les caractéristiques adéquates permettant :

- 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, les critères de sélection des granulats portent sur :

La nature minéralogique : La nature des granulats a une incidence sur la qualité et la zone de transition (ITZ), sur le risque de réactions chimiques comme l'alcali-réaction et sur la déformation différée du béton [Neville 1996] [15]. Les granulats d'origine calcaires offrent en particulier une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment. Ils limitent les risques d'alcali-réaction et possèdent des modules de compressibilité plus proches de la pâte de ciment que les granulats siliceux. En revanche, ils peuvent être sensibles à certaines altérations chimiques acides [8], mais le risque d'alcali-réaction est limité. En revanche, le module de compressibilité est proche de celui de la pâte de ciment ce qui limite l'apparition des fissures. Tandis que les granulats d'origine siliceux sont inertes chimiquement et présentent un module de compressibilité moins proche de la pâte de ciment que les granulats calcaires ce qui peut provoquer des fissures [4].

Dimensions, volume et forme des granulats : Dans les BHP, il y a suffisamment d'éléments fins à cause de la forte teneur en ciment et en ajouts cimentaires. Donc l'utilisation de sable grossier de module de finesse compris entre 2,7 et 3,0 permet une certaine diminution de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour la maniabilité, ce qui est un avantage du point de vue résistance mécanique et économique.

Le remplacement partiel d'un sable fin alluvionnaire naturel par un sable concassé peut présenter quelques avantages surtout si le sable concassé est été fabriqué en utilisant une roche très résistante [3]. La taille des granulats a une influence sur les propriétés de résistance et de durabilité des bétons [16].

L'utilisation de gros granulats permet de diminuer la demande en eau (faible surface à mouiller par unité de masse), ce qui entraîne l'augmentation de la résistance. Mais, dans les BHP 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 ces risques sont limités tant que la dimension maximale des granulats est inférieure à 10 ou 12 mm [3].

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 Powers (1968) [17], Bolomey (1935) [18], Caquot (1937) [19], Faury (1953) [20] et plus récemment le modèle d'empilement compressible (MEC) [de Larrard 1999 ; 2000] [21,22] mis au point au LCPC.

I.3.3. L'Eau de gâchage

L'eau est un des constituants essentiels du béton et son rôle apparaît d'autant plus important que sa quantité peut modifier la constitution même du béton. Elle joue deux rôles essentiels : assurer l'hydratation du ciment et participer activement à l'ouvrabilité du béton frais en lui donnant une rhéologie satisfaisante. Le béton idéal serait celui qui contiendrait assez d'eau pour développer la résistance maximale du ciment tout en conférant au béton frais les propriétés rhéologiques nécessaires à sa mise en place [23]. Dans le béton durci, l'eau se trouve sous diverses formes plus ou moins complexes : l'eau liée chimiquement qui participe à l'hydratation, les liaisons atomiques sont de type ionique ou covalent. Cette eau est considérée comme non évaporable. Ensuite, l'eau adsorbée est soumise au champ de forces électriques superficielles des particules de CSH. On peut distinguer une adsorption physique (forces de van der Waals) et une adsorption chimique (transfert d'électrons). Enfin l'eau libre que l'on trouve dans les pores capillaires. C'est l'eau en excès par rapport à l'eau nécessaire pour l'hydratation [24].

I.3.4. Les Adjuvants

Les adjuvants sont des substances qui peuvent, par leur action physique et/ou chimique, changer les caractéristiques du béton. En fonction du type d'adjuvant utilisé, il est possible d'influencer de manière ciblée les caractéristiques du béton frais (le temps de prise, le processus de durcissement et l'ouvrabilité), ou les caractéristiques du béton durci (la résistance et la durabilité) selon ces fonctions [25] ; L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à une dose inférieure ou égale à 5 % en masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et /ou à l'état durci.

Il existe plusieurs familles d'adjuvants. Après un bref descriptif des différents adjuvants disponibles, nous nous intéresserons plus particulièrement aux super plastifiants utilisés dans les BHP, à leurs propriétés et à leur mode d'action dans la matrice cimentaire.

Les superplastifiants introduits dans un béton, avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange. Ce sont en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de

naphtalène. En 1998, de nouvelles molécules issues de l'industrie chimique, les polyacrylates et les polycarboxylates, ont considérablement amélioré les performances des superplastifiants. Ces adjuvants dits de « nouvelle génération » ont permis notamment le développement des nouvelles familles de béton [26].

L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment (Figure I.2). Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains. En plus de leur charge ionique, certaines molécules vont présenter une structure chimique très encombrée une fois à la surface des grains de ciment, ce qui aura alors pour effet d'empêcher le rapprochement des grains de ciment les uns vis-à-vis des autres : c'est la répulsion stérique (Figure I.3). L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton [27].



Figure I.2. Dispersion des grains de ciment par l'ajout du polymère [26].

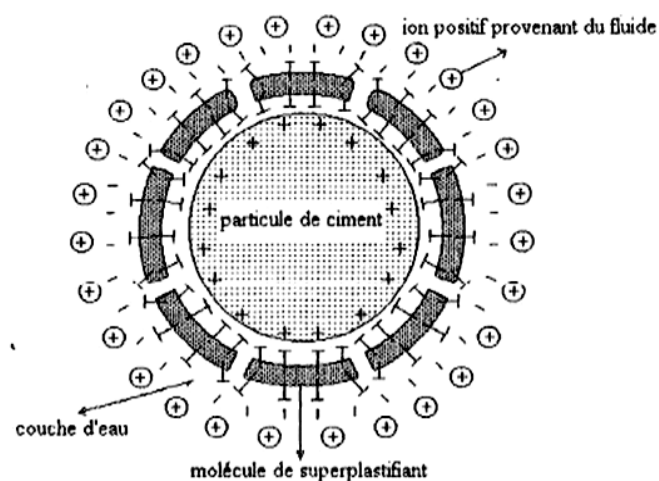


Figure I.3. Mode d'action d'une molécule de superplastifiant [28].

I.3.5. Les Additions minérales

Les ajouts minéraux sont des produits ultrafins composés de particules de très faibles dimensions qui, ajoutés au ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. Ils peuvent être intégrés dans le mélange cimentaire en substitution partielle d'une certaine quantité de ciment ou bien en complément. Cette modification améliore la résistance mécanique et la rhéologie du béton. En substitution du ciment, ces ajouts ont des aspects économiques et environnementaux non négligeables en étant respectivement moins cher et avec un bilan carbone inférieur à celui du clinker [4].

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis ou de béton pour différentes raisons:

- ❖ Améliorer les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité) ;
- ❖ Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité ; réduire le coût de la matière liante: ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante ;
- ❖ Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines: certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice) [29].

I.3.5.1. Fumée de silice

Actuellement les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice condensées. On dit aussi tout simplement fumée de silice ou même microsilice. Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium. Cet adjuvant minéral que l'on commence à peine à utiliser dans l'industrie du béton est principalement caractérisé par son extrême finesse ainsi que par son activité pouzzolanique rapide lorsqu'il est incorporé dans des bétons ou des mortiers.

L'incorporation de la fumée de silice dans le béton contribue à obtenir une pâte très dense, porosité réduite, par son effet physique de remplissage (effet filler) avec ses particules très fines. De ce fait, la résistance est considérablement améliorée [30,3]. Aussi, la fumée de silice améliore les propriétés de transport (perméabilité et diffusion d'oxygène, migration des chlorures) en réduisant considérablement la perméabilité [Aïtcin, 2001]. Aussi le fluage et le retrait de dessiccation sont considérablement réduits avec l'utilisation de la fumée de silice [31]. Cependant, le retrait d'autodessiccation (retrait endogène) est amplifié du fait de l'augmentation de la pression capillaire due à la porosité fine des bétons incorporant de la fumée de silice [32].

D'un point de vue rhéologique, la fumée de silice contribue à augmenter la fluidité du béton par ses particules sphériques qui déplacent les particules d'eau piégées à proximité des grains de ciment. Toutefois, l'emploi de la fumée de silice augmente la demande d'eau et de superplastifiant [33].

I.3.5.2. Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérage des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables [5].

Les cendres volantes peuvent être classées en trois classes principales selon ASTM :

- ✓ **Classe F - c'est une cendre volante silico-alumineuse** avec une teneur en silice (SiO_2) qui varie de 47 à 59%, une teneur en alumine (Al_2O_3) d'environ 22% et une teneur en oxyde de fer (Fe_2O_3) variant de 6 à 9%.
- ✓ **Classe C - c'est une CV de silico-calcique** avec une teneur en silice aux alentours de 36%, une teneur en alumine de 17% et environ 6% d'oxyde de fer.
- ✓ **C'est une CV sulfo-calcique** qui contient 13 à 24% de silice, une forte teneur en calcium et soufre (59% de CaO et 15% SO_3), 5 à 18% de Al_2O_3 et enfin 3 à 17% de Fe_2O_3 [4].

L'utilisation des CV entraîne une réaction pouzzolanique avec la phase vitreuse. Ce qui entraîne une augmentation de la résistance en compressions surtout à long terme. Par contre, les cendres volantes de classe C et de classe F réduisent le développement de la résistance au jeune âge du béton mais augmentent sa durabilité [34].

En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces [26].

I.3.5.3. Laitier de Haut fourneau

Le laitier granulé de haut fourneau est un sous produit de l'industrie métallurgique, dont la composition chimique est pratiquement identique à celle du clinker. C'est-à-dire, il comporte de l'oxyde de calcium, de la silice, de l'alumine, de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités [35]. Le laitier granulé peut être ajouté soit directement dans la composition du ciment, soit introduit dans la composition des bétons en tant qu'ajout. Le laitier granulé présente des

caractéristiques intéressantes en tant qu'addition minérale [36] surtout par rapport à la constante de sa composition chimique. L'emploi du laitier granulé permet de diminuer la quantité de clinker nécessaire pour fabriquer le ciment. Ceci permet à la fois de faire des économies d'énergie et d'éviter de stocker le laitier granulé en décharges [37].

L'effet du LHP sur la résistance mécanique n'est perceptible qu'à long terme à cause de l'hydratation initiale très lente du laitier. En revanche, le fluage et le retrait de dessiccation diminuent dans le cas de BHP contenant du LHF comme addition [31].

D'un point de vue rhéologique le LHF ajouté au mélange réduit la fluidité car il absorbe le superplastifiant. En revanche, le LHF permet de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité de la pâte de ciment [38].

I.3.5.4. Pouzzolanes naturelles

La pouzzolane naturelle (PN) est des substances finement broyées d'origine de roches volcaniques basaltiques ou même de roches sédimentaires. Elle est essentiellement composée siliceuse ou silico-alumineuse contenant 60 à 85% de silice réactive SiO_2 et le reste d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde de fer [39].

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.

Elles sont composées essentiellement de silice, alumine et oxyde ferrique. Selon la norme ASTM C 618 la somme des trois oxydes doit être supérieure à 70 % [40].

L'oxyde de fer peut être retenu comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puisqu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées [41]. Les pouzzolanes naturelles sont employées en cimenteries pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est-à-dire une attitude à fixer la chaux à la température ambiante et former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation [42].

I.3.6. Les Fibres

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de nature variable, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelques millimètres dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle. Les fibres se trouvent sous diverses formes différentes soit

par la nature (métalliques, minérales, végétales et synthétiques) soit par les dimensions (macro ou micro-fibres), soit par la forme (droites, ondulées, crochetées aux extrémités...etc.) et bien évidemment par leurs propriétés mécaniques.

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles ou artificielles.

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix [43].

I.3.6.1. Les fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.

Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opérations.

La Figure I.4 représente les différentes formes des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton.

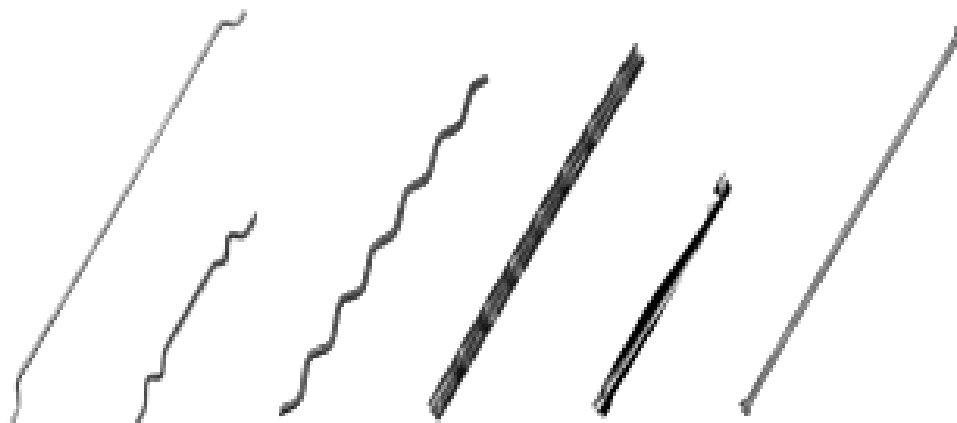


Figure I.4. Différente forme des fibres d'acier [44].

I.3.6.2. Les fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine, verre...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles.

Les fibres de verre sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces, mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire). La fibre de verre obtenue par étirage ou soufflage de verre fondu en filaments.

I.3.6.3. Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des matériaux de type organique, elles sont apparues sur le marché du Génie Civil il y a une dizaine d'année. Avant, on les utilisait comme isolant thermique et acoustique. Progressivement, on les a introduites dans les bétons fibrés pour améliorer leur résistance à la fissuration due au retrait plastique et pour améliorer leur résistance à la compression [45].

Les fibres végétales sont aujourd'hui très utilisées par la filière textile et automobile. Cependant on note que malgré les avantages économiques et écologiques qu'elles présentent, leur introduction dans le bâtiment demeure timide notamment en France contrairement à d'autres pays comme le Japon et le Canada. Parmi les fibres végétales les plus utilisées on cite le chanvre, la paille, le sisal, le coco, le jonc de mer, le lin, le bambou, ... [45].

I.3.6.4. Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques proviennent des polymères organiques et sont le résultat de recherches et des développements de l'industrie pétrochimique et du textile. Les fibres reconnues comme les plus résistantes sont : les polyoléfines, les polypropylènes, les polyéthylènes, le nylon et le carbone. Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques, qui est de 15 à 20 %, favorise la ductilité du béton [46].

Les fibres synthétiques tirées des matières plastiques sont, par contre, peu résistantes au feu. La température de fusion ou température à laquelle les fibres deviennent très molles et perdent leurs propriétés est d'environ 160°C. Les fibres synthétiques en deux catégories selon leur dimension : les microfibres et les macrofibres synthétiques [46].

Tableau I.1. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées [47].

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	Densité	Rt (Mpa)	E (10 ³ Mpa)	Allongement à la rupture en%	Coeff. De dilatation (µ / m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5-500	20-80	7,8	1000 - 3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36 x 2600 de section	50-60	7,8	2500	140	1	-	1500
Verre	5-20	40-70	2,6	1500 - 3000	80	2-3,5	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0,9	400-750	5-10	15-25	90	150
Polyester	-	-	1,4	700-850	8	11-13	-	-
Amiante	0,02-20	5	2,5-3,4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5-9	Variable	1,7 – 2	2000 - 3000	250-400	0,5-1,5		400 -1500
sisal	10-50	1,50	1,5	-	130	3	-	-

I.4. Formulation des BHP

Dans la documentation, on trouve plusieurs méthodes de formulation des BHP. 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.

Dans ce chapitre on va présenter brièvement ces méthodes, avant d'expliquer en détails la méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke et qui a été adopté pour la confection des BHP de cette étude. Cela ne signifie pas que les autres ne sont pas aussi valables que celles présentées.

La formulation des bétons à hautes performances est une opération plus complexe que celle des bétons classiques parce que les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Par ailleurs ces matériaux sont formulés en utilisant largement des sous-produits industriels (fumée de silice, laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes, etc.), et sont souvent en substitution de ciment [5].

La recherche des 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 [48].

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

Trois principales étapes sont nécessaires dans le développement d'un BHP :

✓ ***La détermination d'une formule théorique prévisionnelle :***

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

✓ ***Optimisation du mélange en laboratoire :***

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

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

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

I.4.1. Méthode de formulation

En règle générale, une méthode de formulation permet de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés souhaitées 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.

- 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 Aïtcin(1990) ;
- Méthode de Pedeches (1988) ;
- La méthode de L'Université de Sherbrooke.

I.4.1.1. 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 [12].

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 (Aïtcin et al, 2001) [3]. La quantité contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage.

L'organigramme de cette méthode est présenté à la Figure I.5. 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 superplastifiant ;
- Le dosage en gros granulat ;
- La teneur en air.

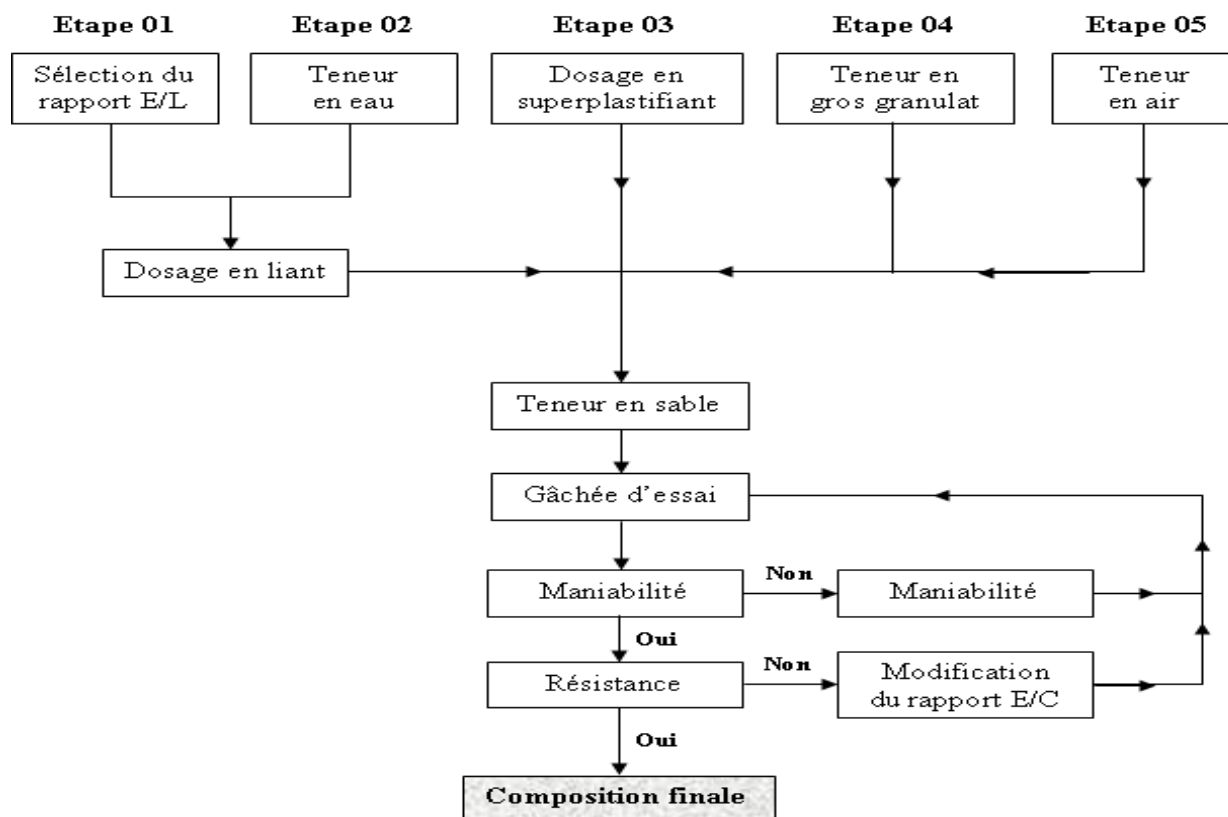


Figure I.5. Organigramme de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP [3].

✓ **Le rapport 'E/L' :**

La résistance des bétons croît en raison inverse du rapport 'E/C' (eau efficace /ciment). On peut trouver le rapport 'Eau/Liant' en utilisant la Figure I.6 pour une résistance à la compression à 28 jours donnée (la résistance à la compression est mesurées sur des cylindres de 100×200 mm). Le fuseau de la Figure I.6 donne une gamme relativement étendue de rapport 'Eau/Ciment' pour une résistance donnée.

On peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise.

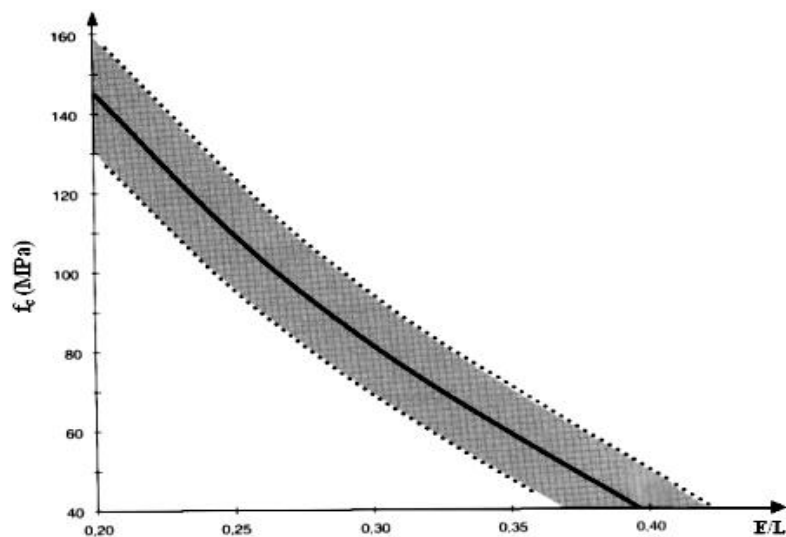


Figure I.6. Relation proposée entre le rapport 'E/L' et la résistance à la compression [3].

✓ **Dosage en eau :**

La Figure I.7 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation.

La dose de saturation correspond à la quantité de superplastifiant, incorporée au mélange, qui au-delà de laquelle il n'y aura plus l'effet fluidifiant supplémentaire. La détermination de cette dose se fait habituellement par la méthode des coulis au moyen du cône de Marsh.

On peut ajouter 5 l/m³ à toutes les valeurs présentées à la Figure I.7. Lorsque le point de saturation du superplastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 l/m³.

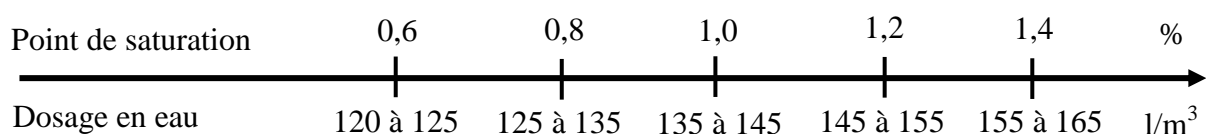


Figure I.7. Détermination du dosage en eau [3].

✓ **Dosage en superplastifiant :**

Pour un rapport 'E/C' inférieur à 0,4, correspondant au domaine des BHP, la résistance prévisible dépasse alors 50 MPa. Cependant, le mélange devient dans la pratique plus difficile à réaliser car il n'y a plus assez d'eau pour assurer la fluidité. La solution consiste à défloculer le ciment par l'utilisation des superplastifiants. Le dosage en superplastifiant 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 superplastifiant égal à 1 %.

✓ **Dosage en gros granulat :**

Le dosage en gros granulats peut être déduit de la Figure I.8 en fonction de la forme des granulats. S'il ya quelques doutes 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/m³.

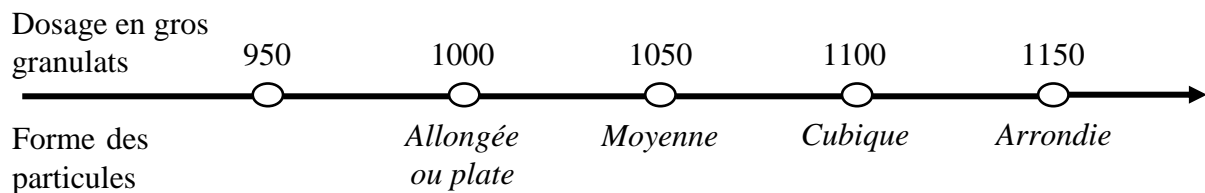


Figure I.8. Dosage en gros granulat [3].

✓ **Teneur en air :**

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, certains auteurs suggèrent de rajouter systématiquement une très faible quantité d'air entraîné dans le BHP. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1,5 % comme valeurs initiale de la quantité d'air piégé et d'ajuster les résultats par la suite en fonction de ce qui est obtenu lors des gâchées d'essai [5].

I.5. Propriétés des bétons à hautes performances BHP

I.5.1. A l'état frais

I.5.1.1. Maniabilité

Il est important de contrôler les propriétés d'un BHP frais pour deux raisons : un BHP doit pouvoir être mis en place aussi facilement qu'un béton usuel et un BHP qui a des propriétés à l'état frais bien contrôlées et constantes, aura très probablement des propriétés tout aussi contrôlées à l'état durci.

Malgré des dosages en eau très inférieurs aux dosages usuels, ces bétons présentent le plus souvent un affaissement au cône d'Abrams d'environ 20 cm en sortie de malaxeur. La séparation

des particules permise par les superplastifiants supprime en effet le seuil de cisaillement de la pâte de ciment fraîche, d'où un béton qui s'écoule sous le seul effet de la pesanteur, avec cependant une vitesse dépendante de la viscosité du mélange, c'est-à-dire du degré de desserrement de l'empilement granulaire par l'eau de gâchage. Pour des rapports eau/ciment inférieur à 0,30, la consistance, bien que fluide, est souvent visqueuse et « collante ».

Le béton se met bien en place, mais nécessite pour cela une vibration comparable à celle de bétons courants de consistance dite « plastique ». Au décoffrage, un certain bullage apparaît parfois, conséquence de la viscosité du matériau frais [12].

Le maintien de la maniabilité peut être de courte durée, si on n'a pas anticipé sur ce problème lors de la formulation (De Larrard,1988) [49]. L'obtention d'une durée pratique d'utilisation supérieure à une heure est cependant tout a fait possible (Figure I.9), en utilisant éventuellement un retardateur de prise, lorsque, par exemple, le ciment contient des aluminates en proportion importante. Signalons la relative inadaptation des moyens classiques pour l'appréciation du comportement rhéologique des BTHP à l'état frais : le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL donnent des résultats peu corrèles pour ces matériaux. Il est sage, en l'absence de moyen spécifique, il faut pratiquer les deux types d'essais, pour avoir une idée de la consistance des bétons testés. De Larrard a trouvé la composition d'un béton THP qui est la suivante, Tableau I.2.

Tableau I.2. Composition d'un béton THP en kg/m³ [49]

Granulats du Boulonnais (calcaire concassé)			Sable de Seine	Ciment CPA 55 HTS	Fumée de silice	Fluidifiant N.S.	Eau	E/C
854	411	326	326	421	42.1	7,59	112,3	0.27

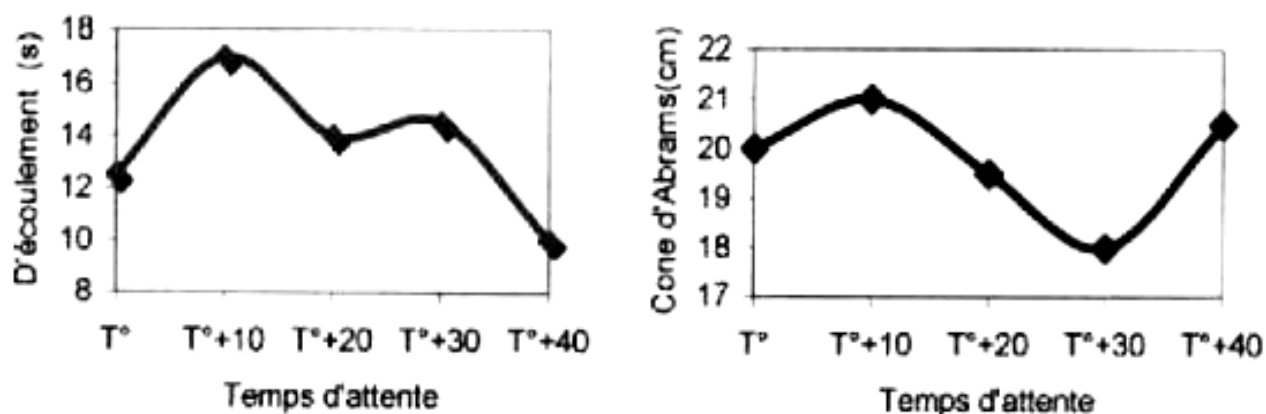


Figure I.9. L'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre et l'affaissement au cône d'Abrams du béton THP pendant l'heure qui suit le coulage (essai à 20°C) [49].

I.5.1.2. Contrôle de la masse volumique

La mesure de la masse volumique ne pose aucun problème. L'essai est simple et il peut être fait à la centrale ; il est un peu moins important de l'évaluer en chantier ou il est préférable de mesurer la teneur en air du béton dans le cas des BHP à air entraîné.

Il est bon de rappeler que la masse volumique d'un BHP frais est légèrement supérieure à celle d'un béton usuel fait avec les mêmes matériaux. La masse volumique d'un BHP sans air entraîné est souvent voisine de 2500 kg/m^3 et de 2400 kg/m^3 pour un BHP à air entraîné. Ce qui représente approximativement 50 à 100 kg/m^3 de plus que la masse volumique des bétons usuels [16].

I.5.2. A l'état durci

Les propriétés mécaniques d'un béton sont essentiellement liées à sa structure et à la nature de ses liaisons inter-particulaires. Le béton à haute performance a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles d'un béton ordinaire, lesquelles sont obtenues grâce à plusieurs facteurs. Les différences les plus importantes apparaissent dans la résistance à la compression, flexion et à la ténacité.

I.5.2.1. Comportement en compression

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulats se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (Figure I.10).

Le BHP se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats (Figure I.11).

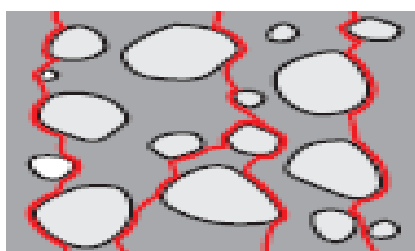


Figure I.10. Béton ordinaires : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier [12].

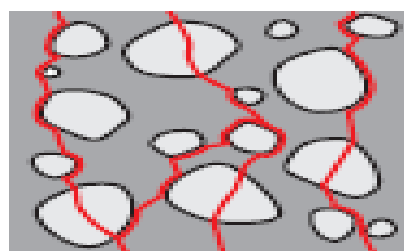


Figure I.11. Béton à haute performance : les granulats sont également fissurés [12].

La résistance en compression représente une qualité de référence pour les BHP tant elle est considérablement augmentée par rapport au béton ordinaire. L'avantage majeur de ces bétons à hautes performances est l'obtention de hautes résistances ; en effet on a utilisé sur chantier des bétons dont la résistance dépassait 60 à 65 MPa et atteignait 80 MPa [2].

Sur le diagramme contrainte-déformation (Figure I.12), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton de résistance conventionnelle. De même, le béton à haute performance présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle.

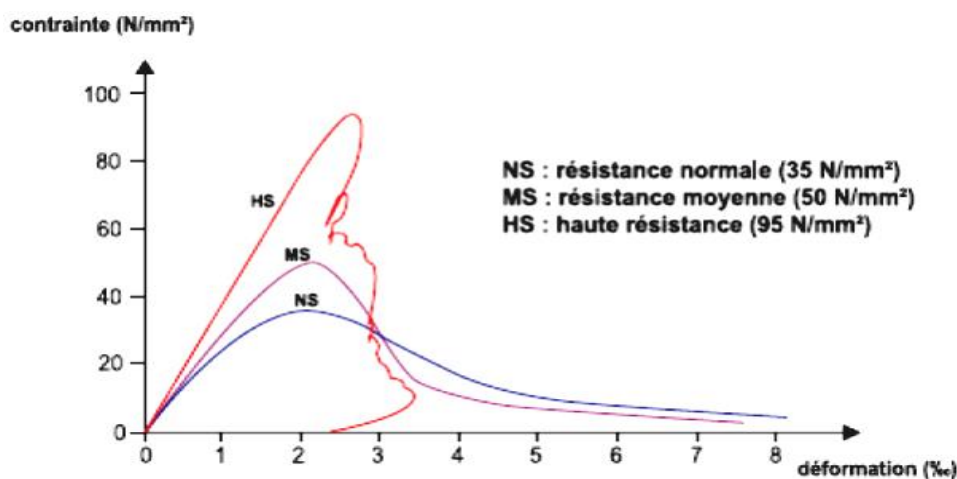


Figure I.12. Diagramme contraintes - déformation [16].

I.5.2.2. Comportement en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression, et elle peut être obtenue par deux méthodes : la traction par flexion et la traction par fendage. Les deux méthodes mesurent la résistance à la traction d'une manière indirecte.

✓ Résistance à la traction par flexion

Celle-ci croît sensiblement par rapport à la résistance en compression ; la relation entre les résistances à la compression et à la traction est de l'ordre de 1/10 à 1/13, soit 0.10 à 0.077 mais lorsque la résistance à la compression est de l'ordre de 100 MPa, la valeur du rapport (f_t/f_c) est beaucoup plus petite, de l'ordre de 1/20. La densification de la matrice et de l'interface pâte – granulats est à l'origine due à l'amélioration de la résistance en traction. Lors des essais de fendage, le faciès de rupture est systématiquement transgranulaire (même avec des granulats siliceux), ce qui montre l'homogénéité mécanique du matériau [50].

✓ *Résistance à la traction par fendage*

Certains investigateurs ont étudié la relation entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression des BHP. Ils concluent que pour les faibles résistances, la résistance à la traction par fendage est de 10% de celle de la compression tandis que pour les résistances élevées, elle est d'environ 5% [50].

Habituellement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton ordinaire, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton ordinaire (Tableau I.3).

Tableau I.3. Le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel [51]

Caracteristiques	Classe de resistance													
	⇐Beton a haute resistance													
f_{ck} resistance caracteristique en compression sur cylindre (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck-cube}$ resistance caracteristique en compression sur cube (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} resistance moyenne en compression (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} resistance moyenne en traction directe (MPa)	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
E_{cm} module d'elasticite secant (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} deformation au pic de contrainte (% ₀)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.25	2.3	2.4	2.45	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8

I.5.2.3. Rigidité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à haute performance est toujours lié à la résistance à la compression et supérieur à celui des bétons traditionnels [16].

I.5.2.4. Retrait

Par définition, on distingue deux types de retrait suivant le mode de conservation du béton.

On parle ainsi de retrait endogène ou d'autodessiccation lorsqu'il n'y a pas d'échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces déformations différées libres sont alors caractéristiques du comportement du matériau au cœur de la structure. Lorsque les échanges hydriques sont permis, le retrait est dit de dessiccation ou de séchage [8].

La différence essentielle au béton traditionnel et un béton à haute performance, est que le béton traditionnel ne développe pratiquement pas ou peu de retrait endogène, qu'il ait subi ou pas une maturation à l'eau. Le Tableau I.4 présente les différences essentielles entre le retrait des bétons ordinaires et des bétons à hautes performances [52].

Tableau I.4. Différences essentielles entre le retrait d'un béton ordinaire et celui d'un BHP

Type de retrait	Béton ordinaire	BHP
Endogène	Peu ou pas du tout	Très élevé
Séchage	Très élevé	Faible

Le Roy et De Larrard [53] ont comparé le retrait endogène des BHP et des bétons ordinaires à différents rapports E/C avec incorporation de fumée de silice pour des âges de maturation de 400 jours. Ils ont conclu que le retrait endogène croît avec des rapports E/C décroissants et pour les bétons incorporant de la fumée de silice [53].

Persson, 1998 [54] à montre la relation entre le retrait endogène et l'humidité relative du béton entre 3 et 4 ans. Plus l'humidité relative initiale du béton est élevée, moins il y a de retrait endogène. La contraction du béton suite à la baisse de l'humidité relative interne lors du processus d'hydratation est en effet moins élevée (Figure I.13).

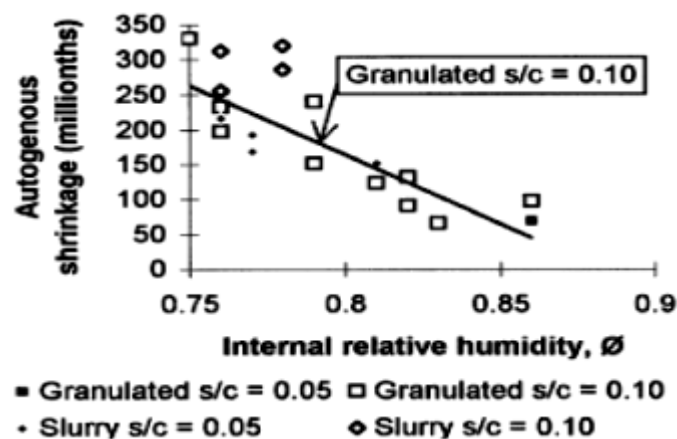


Figure I.13. Retrait endogène à 3-4 ans en fonction de l'humidité relative interne [54].

Sicard, 1993 [55] a aussi entrepris des essais sur des cylindres de 12 cm de diamètre et de longueur 24 cm. Il à montré pour des bétons ayant vieilli 600 jours que le retrait endogène croît avec des rapports E/C décroissants ; qu'il est plus élevé pour des granulats calcaires que pour des granulats silico-calcaires ; et qu'il est plus élevé pour des bétons contenant de la fumée de silice

que pour ceux n'en contenant pas, car la fumée de silice engendre des retraits d'auto-dessiccation élevés liés à l'hydratation et au raffinement de la porosité (Figure I.14).

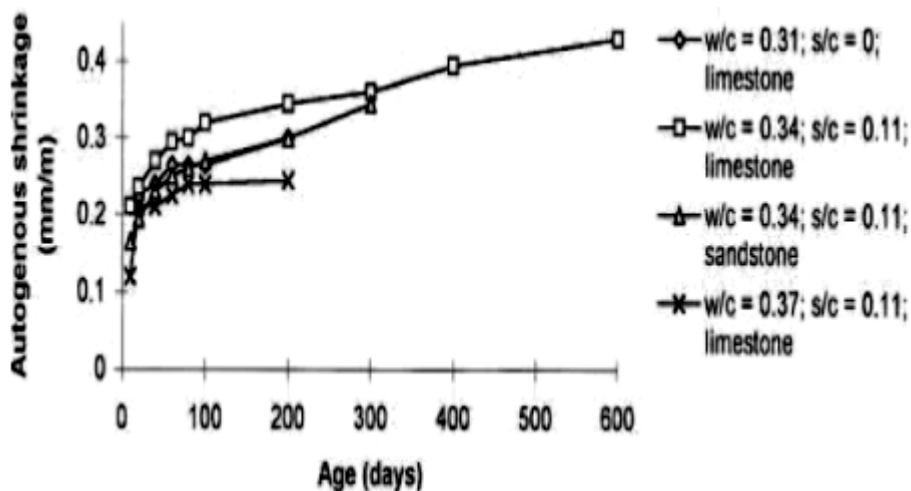


Figure I.14. Retrait endogène après 600 jours pour des granulats calcaires et silicocalcaires (Sicard, 1993), c=ciment, s=fumée de silice [55].

I.5.2.5. Fluage

Le fluage reste proportionnel à la contrainte appliquée (donc à la déformation initiale) pour des chargements au même âge de béton.

Pour un béton avec fumées de silice, le fluage augmente rapidement immédiatement après le chargement ; il peut atteindre dans la première journée de 25 à 30% du fluage total, tout en restant inférieur à celui d'un béton classique. Le fluage total est par contre inférieur d'environ 40 à 50% de celui des bétons usuels, ceci en fonction du pourcentage de fumé de silice incorporé, des pourcentages élevés donnant de moins bons résultats que des pourcentages limités à 6% pour lesquels on observe les fluages les plus faibles.

Le BPEL91 indique que dans le calcul du fluage des BHP dont la résistance caractéristique f_{c28} est supérieure à 50 MPa, on peut prendre le coefficient ϕ , rapport entre la déformation finale de fluage et la déformation réelle instantanée, habituellement égale à 2, une valeur inférieure sous réserve de la justifier par des essais. Ceci traduit bien le fait que la déformation de fluage qui est sensiblement deux fois plus grande que la déformation instantanée pour les bétons classiques, est inférieure dans le cas des bétons HP [2].

D'après Chaid [56], les bétons avec ajouts cimentaires présentent des déformations aux retraits et un fluage plus faibles par comparaison avec le béton de référence (Figure I.15).

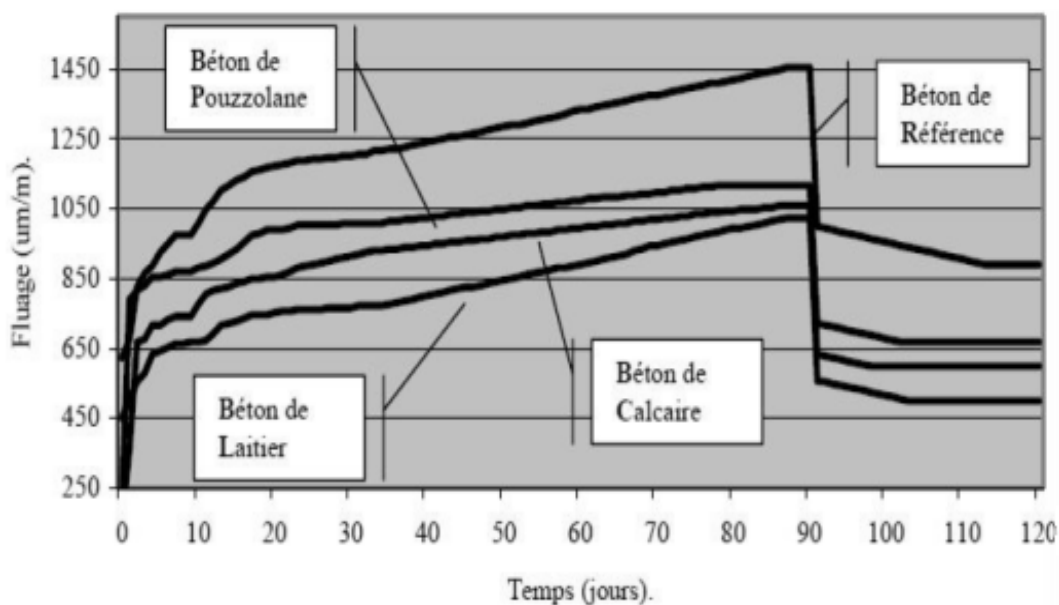


Figure I.15. Évolution du fluage des différents bétons [56].

I.5.2.6. Durabilité

Elle est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures. On constate également une amélioration palpable aux agressions chimiques, qui se traduit par un bon comportement en milieu marin en présence d'eaux agressives [52].

Des études sur les BHP indiquent que ces bétons ont une durabilité " potentielle " élevée et, en particulier, une très bonne résistance aux agents agressifs d'origine externe (la pénétration des chlorures et la carbonatation sont limitées à une zone très superficielle) et interne. Le meilleur comportement des BHP fournit des arguments solides pour prescrire des BHP en vue d'assurer une durée de vie plus longue aux ouvrages en béton armé (ou précontraint) et/ou éviter bon nombre de pathologies (alcali-réaction, lixiviation par les liquides chimiquement agressifs, etc.) [57].

I.6. Microstructure des BHP

Le béton à haute performance BHP, comme tous les bétons, est un matériau hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométrique des granulats mais aussi de la diversité des produits d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative), il est constitué de deux phases principales : une phase liante qui est la pâte de ciment durcie (matrice cimentaire) et une phase granulaire (granulats). Ainsi que la structure de l'interface pâte/granat (appelé zone de transition interfacial).

A l'échelle de microstructure, l'observation de la pâte de ciment, on peut distinguer les hydrates (C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfoaluminates), les fillers, les noyaux non hydratés du clinker (silicates et aluminates de calcium), les discontinuités de texture comme les microfissures, les orientations cristallines ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'auréole de transition, interface pâte de ciment-granulat) et les transformations d'hydrates dans les environnements agressifs (ettringite secondaire, thaumasite, gel de réaction alcali-granulat) [58].

I.6.1. Peau du béton

La pâte durcie montre toujours une mince couche poreuse comme lors de la mise en place du béton. Juste quelques cristaux de chaux de plus petite taille que dans le béton classique peuvent être localisés. Quelques fissures (inférieure à 1 μm de largeur) apparaissent, ainsi qu'une grande proportion de gel de C - S - H, caractéristique du BHP [59].

On remarque aussi une structure alvéolée qui représente probablement les empreintes laissées par les grains de ciment lors de la fracturation de l'échantillon. Ceci indique la présence d'un gradient de rapport 'E/C' dans le matériau [60].

Tout récemment, quelques auteurs ont reconnu l'importance de la peau de béton (tout au moins celle des 20 à 30 premiers mm) du point de vue de la durabilité. En effet, il est bien connu depuis longtemps que la peau du béton n'a pas exactement la même composition ni la même microstructure que le coeur du béton à cause de l'effet de paroi [56].

I.6.2. Microstructure interne

Elle est similaire à celle de la peau sauf que, l'hydratation y est plus avancée. Aucun cristal d'ettringite n'y a été détecté. Même les cristaux de portlandite sont rares. L'analyse des lamelles de bélite ne montre aucune hydratation. La structure alvéolée des C-H-S observée à la peau apparaît également à l'intérieur du béton [59].

I.6.3. Interface pâte-granulats

Les propriétés physico-mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires dépendent non seulement de la qualité de la pâte de ciment (nature du ciment utilisé, rapport E/C, adjuvants, etc.), de la nature et la granulométrie des agrégats et de la proportion de chacun deux, mais elles sont également liées à la qualité de la liaison qui s'établit lors de l'hydratation entre la pâte de ciment et les particules granulaires [60]. Cette liaison donne naissance à une zone appelée « auréole de transition » ou « zone de transition interfaciale ».

Pour les bétons à hautes performances, modifiés par l'ajout de fumée de silice, nous pouvons obtenir une réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone. En comparant avec le béton ordinaire, où l'auréole de transition est d'environ 50 μm , son épaisseur pour les bétons à hautes

Le béton à haute performance (BHP), qui à une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale utilisé traditionnellement. L'emploi des bétons à hautes performances se justifie pour toutes constructions fortement sollicités et notamment pour [2] :

- Les ouvrages de grandes portées (Ponts, Viaduc, etc.) ;
- Les immeubles de grande hauteur (IGH) également nommés gratte ciel ;
- Des pièces préfabriquées très courtes, (voussoirs pour pont, etc.) dont le délai de décoffrage est très court ;
- Des ouvrages en milieu marin (digue, plates formes pétrolières,) ;
- Les ouvrages de génie nucléaire (centrale nucléaire).

Ces bétons permettent d'alléger le poids mort des structures, d'augmenter les cadences de pose des éléments préfabriqués et celles de décoffrage des éléments coulés en place, et de minimiser l'entretien.

I.7.1. Exemples d'ouvrages réalisés en BHP

❖ Les Bâtiments :

- ✓ *Lake Point Tower* ($f_c = 53\text{MPa}$) : est un gratte-ciel résidentiel à Chicago, Il mesure 197 m construit en 1965-1968 [63].
- ✓ *River Plaza* ($f_c = 77\text{MPa}$) : est un gratte-ciel de 160 m situé à Chicago, l'achèvement des travaux de gratte-ciel été en 1977 [64].



Figure I.17. Lake Point Tower [63] & River Plaza [64].

❖ *Les Tunnels :*

- ✓ *Le tunnel de Villejust :* construit à Paris et se situe entre Massy LNA et Courtalain BIF. (4806 m) [65].
- ✓ *Le tunnel sous la manche :* Le tunnel sous la manche est un tunnel ferroviaire reliant la Grande-Bretagne et la France, long de 49,7 kilomètres dont 37 sous la mer, ce tunnel passe sous la manche entre Coquelles et Folkestone à quelques kilomètres de Douvres [65]. Il a été inauguré le 6 mai 1994. Aujourd'hui, ce tunnel fait circuler jusqu'à 53 trains par jour, assurant une liaison France-Angleterre en seulement 35 minutes.



Figure I.18. Tunnels de Villejust & Tunnel sous la manche [65].

❖ *Les Ponts :*

- ✓ *Le pont de l'île Rousski :* est un pont à haubans de 1104 m de portée principale qui relie la ville de Vladivostok à l'île Rousski (kraï du Primorie, Russie), la construction du pont a débuté en 03 septembre 2008 et il a été ouvert à la circulation le 1^{er} août 2012 [66].
- ✓ *Pont de l'île de Ré :* la construction du pont de l'île de Ré (Figure I.19) de 3 km de long a débuté en septembre 1986 et il a été ouvert à la circulation le 19 mai 1988. Il a été construit avec un BHP contenant de fumé de silice (affaissement : 15cm, R_{28j} moy = 67.7 MPa) [67].



Figure I.19. Les ponts de l'île Rousski [66] & l'île de Ré [67].

I.8. Conclusion

Dans le présent chapitre de la recherche bibliographique, on a présenté une généralité qui nous a permis de comprendre mieux cette nouvelle technologie, ensuite les principales propriétés et constituants du BHP ainsi que sa formulation et son utilisation mondiale.

Nous avons mis en évidence la différence entre les bétons à hautes performances (BHP) et les bétons ordinaires (BO), Les BHP contiennent des ajouts cimentaires (les fines) et notamment la fumée de silice, permettant l'amélioration de sa résistance mécanique. Ils sont caractérisés par une faible perméabilité, une grande densité, et une durabilité accrue pour développer certaines caractéristiques, à savoir : les résistances mécaniques et les caractéristiques rhéologiques.

Les bétons aux nouvelles performances compte tenu de leurs multiples performances s'adaptent aux diverses contraintes et exigences des ouvrages. Ils ouvrent de grandes perspectives d'applications pour les ouvrages nécessitant des résistances importantes, durabilité et esthétique. Leurs performances exceptionnelles offrent la possibilité de nouveaux domaines d'applications et de nouvelles structures de bâtiment ou ouvrages d'arts.

CHAPITRE II :

LES BÉTONS FLUIDES À HAUTES PERFORMANCES

II. LES BETONS FLUIDES A HAUTES PERFORMANCES

II.1. Introduction

Le béton fluide à haute performance BFHP est relativement récent dans le secteur des matériaux de construction à rhéologie adaptée représentant une nouvelle génération de béton à haute performance. Ces bétons possèdent un faible seuil de cisaillement et une viscosité plastique similaire à celui du béton conventionnel. Pour concevoir un tel matériau, l'utilisation des adjuvants chimiques est indispensable, notamment, des superplastifiants, des agents de viscosité et des agents entraîneurs d'air. De manière pragmatique, il s'avère nécessaire de comprendre les interactions entre différents types d'adjuvants et de développer une base de données qui sera d'une grande utilité dans la phase de conception des matériaux cimentaires à rhéologie adaptée [68].

II.2. Notions sur les bétons fluides

Les bétons fluides sont des bétons spéciaux, fluides et homogènes, se mettent en place sous l'effet de leur poids propre et sans vibration interne ou externe, même dans des milieux très ferraillés. Ces nouveaux bétons sont qualifiés d'autoplaçant lorsque le matériau présente à l'état frais une grande fluidité et une bonne stabilité (absence de ségrégation ou de ressuage) et garantit à l'état durci une résistance mécanique au moins équivalente à celle d'un béton ordinaire [69].

II.3. Comparaison entre un béton ordinaire et un béton fluide

Comparativement au béton ordinaire, les bétons fluides se caractérisent par une composition différente notamment :

- Volume de pâte : le dosage en ciment est pratiquement le même que celui des BO, cependant les bétons fluides nécessitent un volume de pâte plus important obtenu par l'ajout des fines.
- Le dosage en gros granulat est réduit jusqu'à une valeur permettant de ramener le rapport (Gravier / Sable) proche de 1.
- La taille maximale des gros granulats est généralement limitée pour éviter les risques de blocage.

Généralement, le béton fluide et le béton ordinaire ont les mêmes volumes d'eau et des dosages en sable assez proches.

Les éléments fins peuvent aussi assurer un arrangement entre stabilité et maniabilité. Mais il est difficile d'obtenir une fluidité accessible aux bétons fluides BF, il est donc indispensable d'ajouter aux BF un défloculant comme des superplastifiants. Il est aussi, possible d'ajouter un agent de viscosité au mélange si nécessaire parce que les éléments fins ne sont pas toujours

suffisants pour éliminer le risque de ségrégation. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de molécules organiques, qui rendent la viscosité de l'eau plus élevée et garantissent aussi une bonne stabilité du mélange [70,71]. Cependant, le surcoût de ces agents rend leur utilisation peu répandue.

Il peut être désigné sous le nom de béton fluide à haute performance (BFHP). En d'autres termes, en combinant les caractéristiques et les avantages des BHP et des BF, on peut produire du béton fluide à haute performance (BFHP) qui possède les avantages dans les deux formes de béton frais et durci, c'est-à-dire en présentant une résistance et une durabilité plus élevées, allié à une grande fluidité [72].

Le BFHP offre des performances optimisées en fonction des caractéristiques d'écoulement, de la résistance, des propriétés de transport et de durabilité, conformément aux exigences de durée de vie sous un ensemble de matériaux donné, charges et conditions d'exposition.

II.4. Propriétés des bétons fluides à hautes performances BFHP

Le BFHP diffère du béton ordinaire (BO) par rapport à ses performances aux états frais et durcis. Il incorpore plusieurs ingrédients spéciaux tels que les superplastifiants hauts réducteurs d'eau, les additions minérales et les agents de viscosités, en plus des matériaux de base utilisés pour le béton ordinaire. Les proportions de matériaux composant le BFHP sont également significativement différentes de celles du béton ordinaire [73,74]. Le BFHP comprend une quantité beaucoup plus élevée de liant, une teneur en eau plus faible, une quantité plus élevée d'agrégats fins et une quantité moindre d'agrégats grossiers que le béton ordinaire.

Le rapport Eau/liant équivalent (E/L_{éq}) du BFHP est également beaucoup plus bas que celui du béton ordinaire. Alors que le béton ordinaire présente un rapport Eau/liant équivalent supérieur à 0,50, le BFHP a besoin d'un rapport Eau/liant équivalent variant généralement entre 0,20 et 0,40 [75,76].

L'ouvrabilité de ces bétons se décompose en trois caractéristiques principales :

- La fluidité (mobilité en milieu non confiné) ;
- La résistance à la ségrégation (stabilité).
- La capacité de passage (mobilité en milieu confiné) ;

Pour évaluer les propriétés et les qualités d'un BAP à l'état frais (capacité de remplissage, stabilité et déformabilité), plusieurs essais, normalisés ou non, ont été mis au point.

L'essai le plus utilisé est l'essai d'étalement. Il s'effectue avec le cône d'Abrams. On mesure le diamètre moyen de la galette de béton obtenue une minute après le soulèvement du cône. En

général, une valeur de 60 à 70 cm est visée pour un BAP. On mesure parfois aussi la vitesse d'écoulement qui est le temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Il donne une indication sur la viscosité du matériau (une valeur typique de 4 à 10 secondes est attendue). Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non [77].

II.4.1. La fluidité (la capacité au remplissage)

Le béton fluide est compétent d'occuper les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, se mettent en place sous l'effet de leur propre poids et de leurs caractéristiques d'écoulement, et sans vibrations externe ou interne. La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation. Elle pourrait être maximale pour une déformabilité maximale et pour une ségrégation faible, celle-ci dépendrait uniquement de la quantité de l'eau [Ozawa et al, 1991] [78].

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donner une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. La Figure II.1 montre la relation entre les différentes caractéristiques du béton autoplacant.

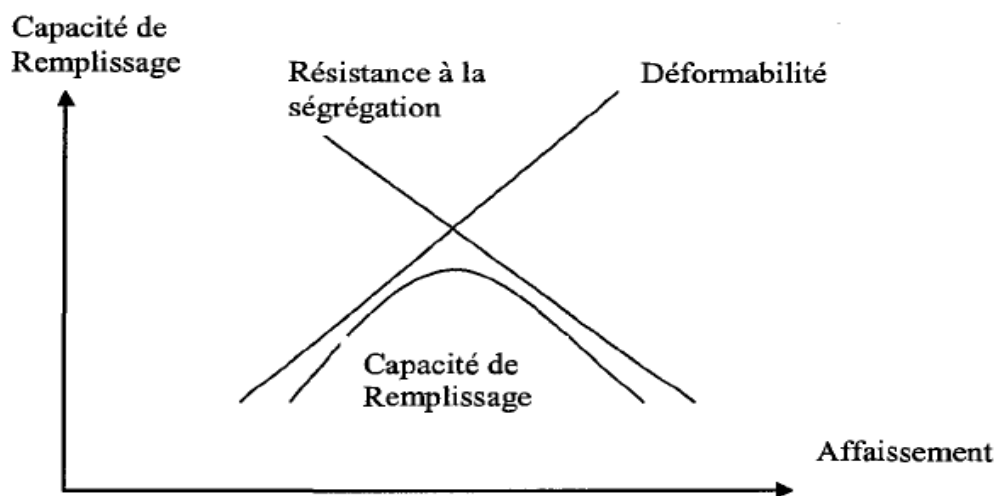


Figure II.1. Relation entre capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton [Ozawa et al, 1991].

Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [79], puisque le diamètre final atteint par la

galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre correspond à la vitesse de la déformation du béton.

Miura et al, ont montré que la résistance à la ségrégation dépend essentiellement de la viscosité du mortier les composant et du volume des gros grains. Une augmentation de la viscosité minimiserait donc la ségrégation. La composition des bétons autoplaçants doit donc contenir des constituants supplémentaires en dosages différents par rapport aux bétons ordinairement conçus et vibrés.

Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Les travaux de YURUGI, M & al [80] montrent que le volume des gros granulats dans le béton et l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue (Figure II.2).

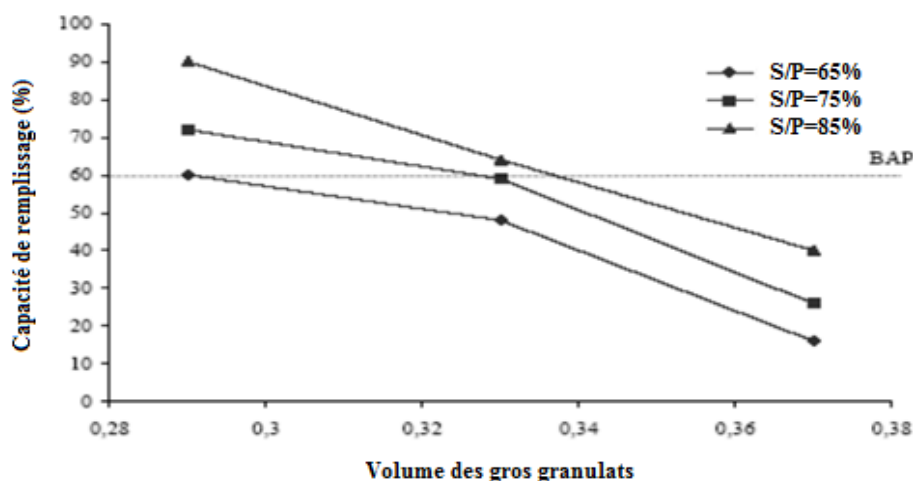


Figure II.2. Variation de la capacité de remplissage en fonction de la teneur en gros granulats, pour différents rapport sable sur pâte [80].

II.4.2. Résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solides et liquides ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [79]. La ségrégation des particules solides peut être le résultat de la migration des fines vers le haut et la sédimentation de gros granulats vers le bas. Une bonne résistance à la ségrégation indique que la distribution granulaire est relativement homogène dans le mélange [81].

La stabilité du béton est affectée par le malaxage, la forme et la granulométrie des granulats, la fluidité et la consolidation [82]. Quand la cohésion de la pâte de ciment est faible, les grains de ciment et les granulats ne peuvent pas être retenus en suspension et se sédimentent [83].

II.4.3. Capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferrillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de granulats dans le béton (plus de gravier, plus de risques de blocages), et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Le volume des gros granulats dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue (Figure II.3).

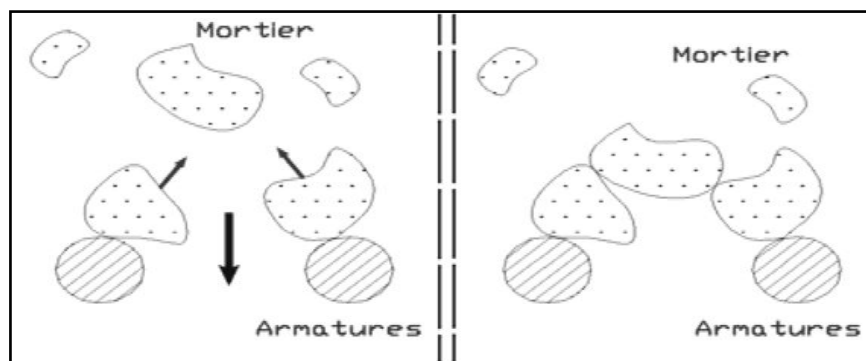


Figure II.3. Formation d'arches pouvant bloquer l'écoulement du béton [84].

A l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures [85]. Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton.

II.5. Rhéologie des bétons fluides

La rhéologie est la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière. Elle a pour objet d'analyser les comportements mécaniques des substances et d'établir leurs lois de comportement. Il est possible de classer les matériaux en fonction de leurs comportements rhéologiques en matériau à comportement visqueux, élastique ou viscoélastique. Un fluide visqueux peut se déformer de manière irréversible sous l'action d'un effort de cisaillement.

Ce type de fluide obéit à la loi de Newton. Par contre, un solide est capable de résister de manière élastique à un tel effort en respectant la loi de Hooke, du moins tant que l'intensité ne dépasse pas un certain seuil. Le comportement viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement d'un solide élastique et d'un liquide visqueux [86].

La rhéologie a connu un intérêt croissant dans le domaine des matériaux de construction. Pour le béton, la rhéologie désigne généralement l'étude de l'ouvrabilité de ce matériau c'est-à-dire à l'état frais où il est considéré comme un fluide.

Les paramètres fondamentaux de la rhéologie du béton sont:

- Contrainte de cisaillement (τ) ;
- Seuil de cisaillement (τ_0) ;
- Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) ;
- Viscosité plastique.

L'obtention de la contrainte de cisaillement τ et de la vitesse de cisaillement ou taux de déformation $\dot{\gamma}$ dans ces géométries permet d'établir des rhéogrammes ou courbes d'écoulement. Ces dernières relient généralement les contraintes de cisaillement aux vitesses de cisaillement et permettent de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement du matériau.

Benyamina et al [87]. A été étudié la relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement du BAP en fonction de la teneur en fines calcaires, il a conclu que l'augmentation du pourcentage des fines diminue l'étalement et augmente la contrainte de cisaillement, aussi cet accroissement est liée par la grande surface spécifique (finesse) des fines calcaires qui donne une augmentation de la demande en eau. (Figure II.4).

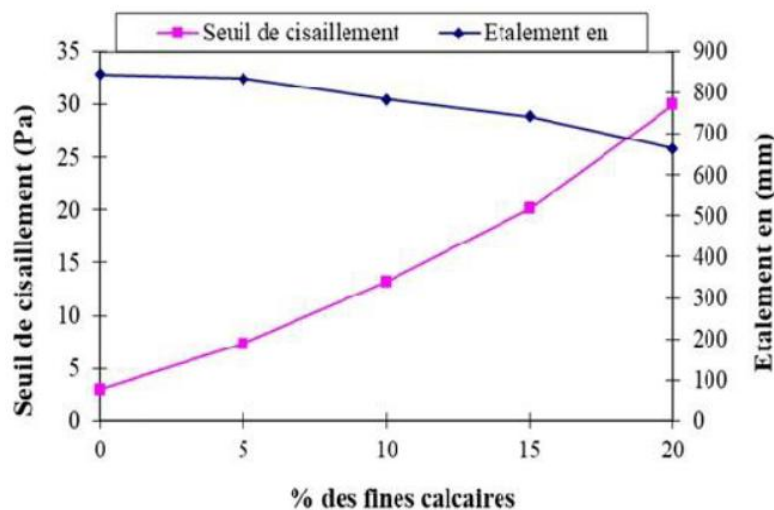


Figure II.4. Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement en fonction des fines calcaires [87].

En outre, l'analyse de la relation entre étalement et le seuil de cisaillement fait par benyamina [87], il a montré que il ya une diminution de l'étalement mesuré avec l'augmentation du seuil de cisaillement des mélanges des BAP comme illustre sur la Figure II.5.

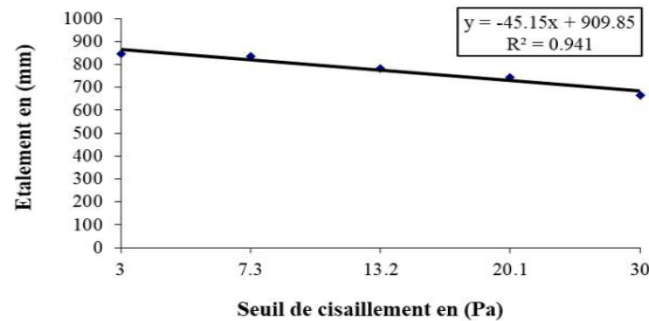


Figure II.5. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement [87].

II.5.1. Rhéomètre

Les rhéomètres sont des outils élaborés pour caractériser la rhéologie des bétons frais. Différentes techniques sont employées et préconisées par les normes pour évaluer le comportement rhéologique des coulis et des bétons. Certaines sont implicites et faciles à utiliser sur chantier et d'autres nécessitent des appareils de pointe pour évaluer les constantes rhéologiques avec précision. Il existe actuellement plusieurs types d'appareils, appelés rhéomètres, qui permettent de mesurer les paramètres rhéologiques du béton [88].

Le rhéomètre à béton est généralement plus complexe que le rhéomètre traditionnel destiné aux corps liquides. Il est typiquement de dispositif à contrôle de vitesse et piloté automatiquement par un ordinateur. Son principe est de soumettre le béton aux différentes vitesses de rotation (taux de cisaillement $\dot{\gamma}$) et de mesurer les résultantes des couples de cisaillement (contraintes de cisaillement τ). En fonction de ces grandeurs, la courbe d'écoulement obtenue, appelée également rhéogramme, est définie souvent par deux propriétés rhéologiques fondamentales ; la viscosité plastique μ et le seuil de cisaillement τ_0 . Des configurations géométriques typiques de rhéomètre à béton sont illustrées sur la Figure II.6 [39].

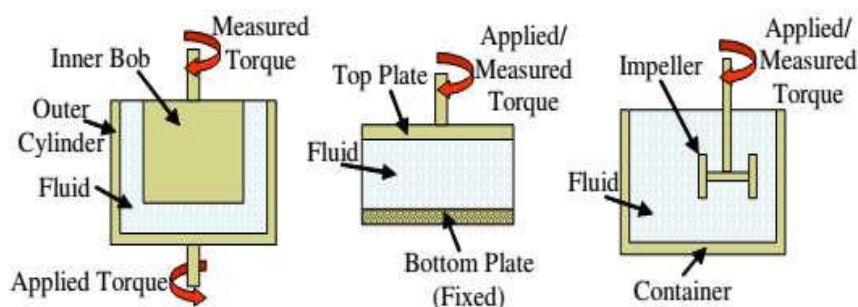


Figure II.6. Types de rhéomètres à béton [Koehler & Fowler] [89].

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- *Rhéologie expérimentale* : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation) ;
- *Rhéologie structurale* : explication des comportements à partir de la structure du matériau ;
- *Rhéologie théorique* : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

II.5.2. Rhéogramme

Une rhéogramme, aussi appelée courbe d'écoulement d'un fluide en régime permanent, est une représentation graphique de l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ), en fonction de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$), ou de l'évolution de la viscosité apparente (μ), en fonction de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$).

II.5.3. Propriétés rhéologiques

Parce que le béton, à l'échelle macroscopique, s'écoule comme un liquide, l'équation (II.1) est applicable. Si une force de cisaillement est appliquée à un liquide comme illustré à la Figure II.7, un gradient de vitesse est induit dans le liquide. Le facteur de proportionnalité entre la force et le gradient s'appellent la viscosité.

Le gradient de vitesse est égal au taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. Le liquide qui obéit à cette équation est dit newtonien [90].

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Équation II-1}$$

Où :

F - Force de cisaillement ;

A - Surface du plan parallèle à F ;

τ - Contrainte de déformation ;

μ - Viscosité ;

$\dot{\gamma}$ - Taux de cisaillement (gradient de vitesse $d\mu / dy$).

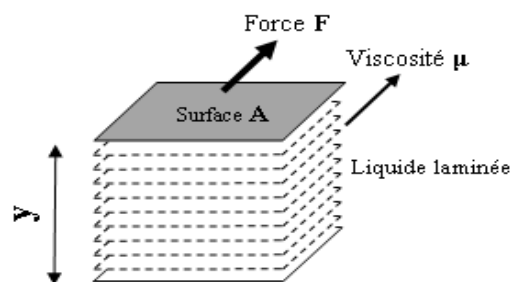


Figure II.7. Déformation d'un fluide sous l'effet d'une force F [90].

L'équation linéaire entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse (Equation II-1) décrit le comportement rhéologique des fluides Newtoniens (pas de résistance initiale à la déformation). Puisqu'elle correspond dans ce cas à la pente de la courbe d'écoulement rectiligne (Figure II-8(a)). Elle est synonyme de la viscosité apparente, souvent utilisée par certains auteurs [91].

Par contre, les fluides Binghamiens (ou de Bingham) nécessitent une contrainte minimale τ_0 non nulle pour s'écouler. Il existe aussi la viscosité plastique μ qui est définie comme la pente de la courbe d'écoulement à chaque point. Ainsi, la viscosité plastique d'un fluide de Bingham, appelée viscosité plastique de Bingham (μ_B) par certains auteurs, est constante puisque la courbe d'écoulement est rectiligne (Figure II.8).

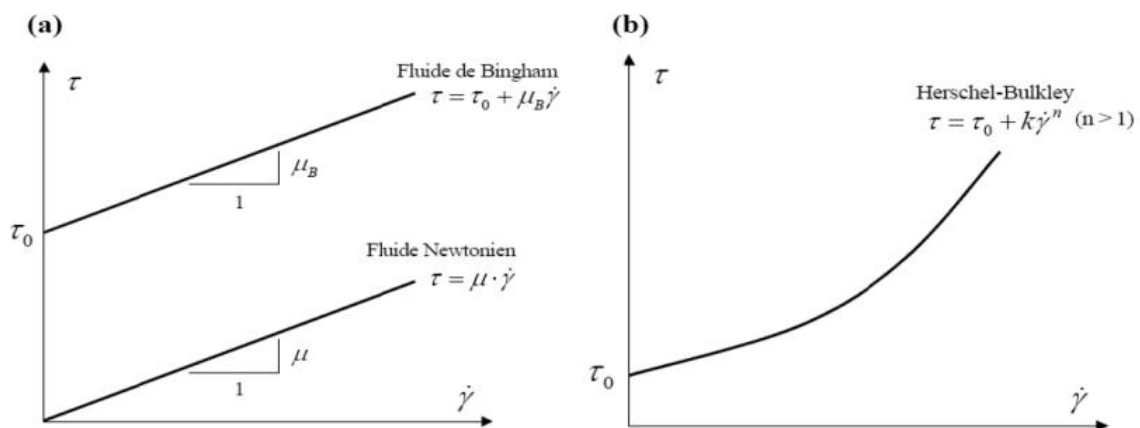


Figure II.8. Allures des rhéogrammes types (a) : Newtonien, Binghamien et (b) : Herschel-Bulkley [92].

II.6. Rhéologie des matériaux cimentaires

Généralement, les coulis de ciment, les mortiers et les bétons ont approximativement le comportement d'un fluide Binghamien, avec un seuil de cisaillement τ_0 , et une viscosité μ [87].

Plusieurs travaux ont permis de décrire le comportement rhéologique des bétons et mortiers à l'état frais par le modèle de Herschel-Bulkley ou celui de Bingham, qui est en fait une forme simplifiée du modèle de Herschel-Bulkley [93,94]. Ils permettent d'identifier les paramètres rhéologiques : seuil de cisaillement τ_0 et viscosité plastique μ .

Le modèle le plus répandu est celui de Bingham :

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} & \text{si } \tau > \tau_0 \end{cases} \quad \text{Équation II-2}$$

Où :

τ - Contrainte aux cisaillements

$\dot{\gamma}$ - Gradient de vitesse.

Plusieurs auteurs ont montrés que les BAP possèdent généralement un comportement Binghamien avec un τ_0 de faible valeur [95,96].

Toutefois, d'autres auteurs rapportent que les BAP ont généralement un comportement non linéaire rhéo-épaississant et suivent le modèle de Herschel-Bulkley [93-97,98] (Figure II.8 (b)) :

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n & \text{si } \tau > \tau_0 \end{cases} \quad \text{Équation II-3}$$

Où :

K (Pa.sⁿ) : coefficient de consistance et n : indice de fluidité.

Papanastasiou (1987) [99], a proposé un modèle basé sur la fonction exponentielle afin de régulariser le model de Bingham en introduisant un paramètre de contrôle m . Ce modèle est appelé généralement le modèle de Bingham-Papanastasiou [100], il s'exprime comme suit :

$$\tau = \tau_0[1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + \dot{\gamma}\mu \quad \text{Équation II-4}$$

Avec :

m : Paramètre de régularisation/contrôle (si $m = 0$ fluide newtonien, si $m \rightarrow \infty$, fluide Bingham idéal)

Néanmoins, les résultats de rhéomètre sur le BAP et le BHP montrent que la relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement n'est pas toujours linéaire (Figure II.9).

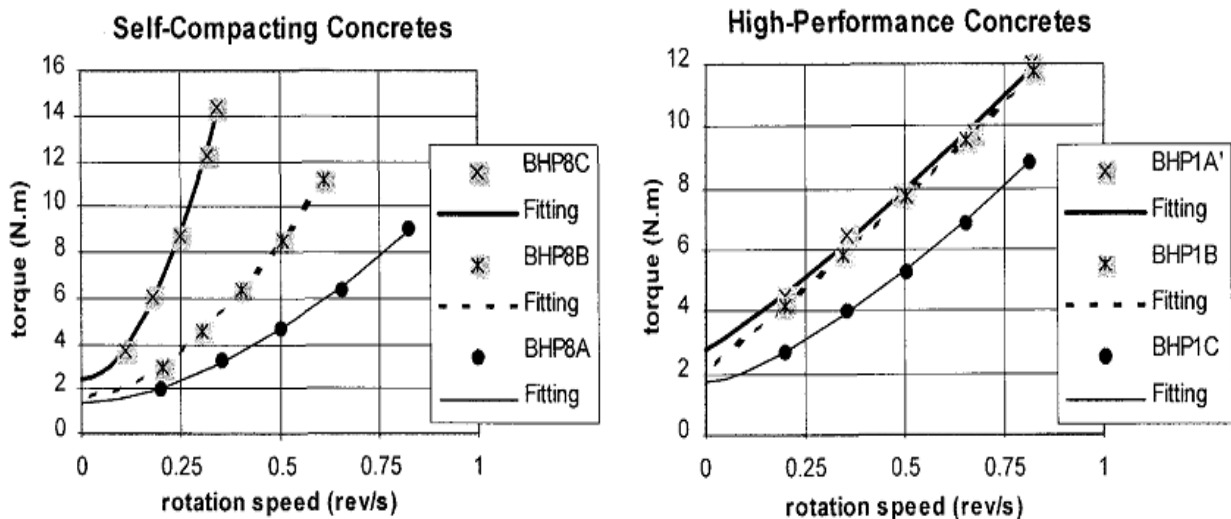


Figure II.9. Rhéogrammes de BAP et BHP [97].

II.6.1. Facteurs influençant la rhéologie des bétons fluides

Comme toutes les caractéristiques du béton, ses paramètres rhéologiques dépendent fortement de sa composition et des propriétés physico-chimiques de ses composants. Le Tableau II.1 présente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour pâte, mortier et béton [88].

Tableau II.1 : Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de Matériau [88]

Paramètres	Pâte	Mortier	BAP	Béton fluide	Béton ordinaire
Seuil de cisaillement τ (Pa)	10-100	80-100	50-200	100-400	500-2000
Viscosité plastique μ (Pa.s)	0,01-1	1-3	20-100	20-100	50-100

Les facteurs qui influençant la rhéologie du béton frais sont nombreux. Chaque changement effectué sur la composition d'un mélange de béton influence à des niveaux différents ses propriétés. Les principaux facteurs influencent le comportement rhéologique du béton frais sont les suivants ;

II.6.1.1. Effet du rapport eau-ciment

Le rapport eau/ciment est certainement un paramètre très important. L'augmentation du rapport E/C diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Les éléments de composition reliés à la quantité d'eau ou au rapport E/C sont les éléments prépondérants du point de vue des propriétés rhéologiques.

Dans la plupart des études, le rapport E/C a une influence sur les propriétés rhéologiques des bétons. D'après DOMONE P et al [101], lorsque le rapport E/C augmente, les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique du béton diminuent.

La Figure II.10 montre l'influence du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du béton [101].

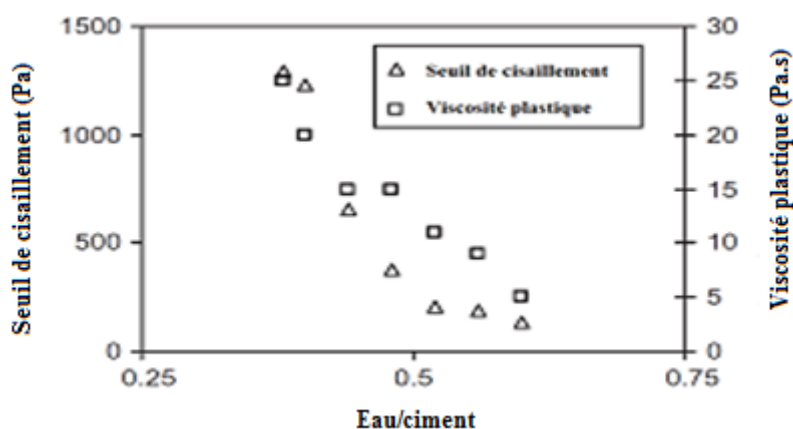


Figure II.10. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [101].

Même constatation trouvée par Tattersall [102], et Westerholm [103] (Figure II.11 & II.12).

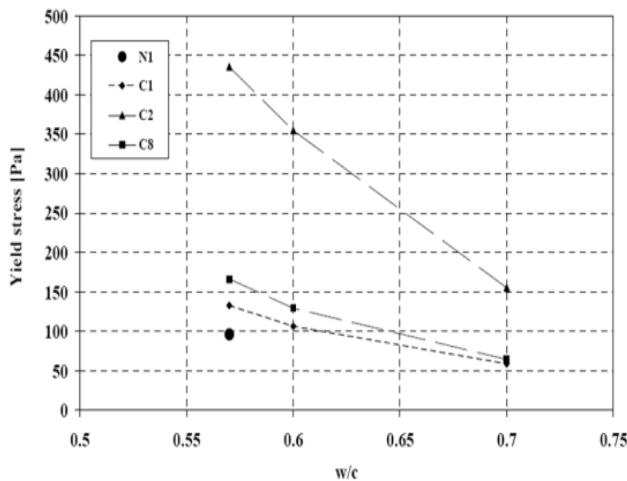


Figure II.11. Effet du rapport e/c sur le seuil de cisaillement de différents mortiers (tiré de Westerholm, 2006).

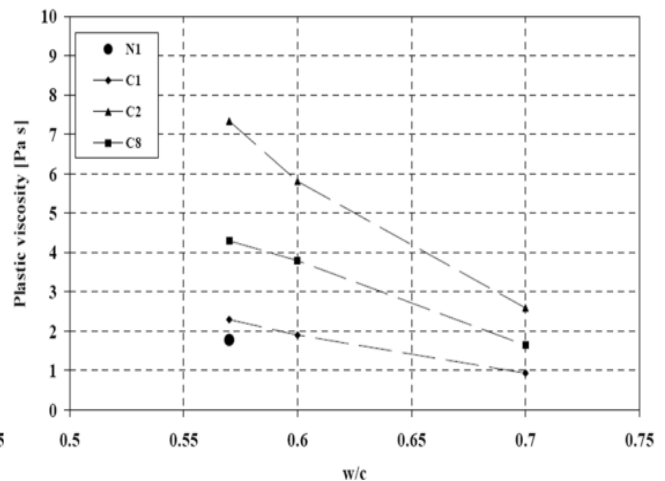


Figure II.12. Effet du rapport e/c sur la viscosité plastique de différents mortiers (tiré de Westerholm, 2006).

II.6.1.2. Effet des caractéristiques du ciment

L'influence des caractéristiques du ciment sur la rhéologie est moins prononcée que celle du squelette granulaire. Toutefois, son influence est non négligeable, particulièrement pour les mélanges riches en ciment [102]. Les principales caractéristiques du ciment influençant la rhéologie sont :

- La composition chimique du ciment ;
- La finesse du ciment;
- La quantité de ciment dans le mélange.

Asakura *et al.* [104] ont constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport C_3S/C_2S ou C_3A/C_4AF lorsqu'un superplastifiant de PNS est employé.

La surface spécifique est l'une des façons de caractériser la finesse du ciment. Vom berg (1979) [105] a démontré que la finesse d'un ciment est un facteur affectant considérablement les caractéristiques rhéologiques.

Didouche *et al.* [106], ont étudié l'influence de la finesse de ciment sur la rhéologie du mortier contenant d'un ciment modifié par l'ajout de filler calcaire (quatre finesse C1, C2, C3 et C4). Leurs résultats montrent que le seuil de cisaillement et la viscosité du mortier augmentent lorsque la finesse du ciment passe de $3026 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et pour des dosages en Polycarboxylate inférieurs à 0.8%.

II.6.1.3. Effet des additions minérales

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions minérales interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés. En plus, certaines additions peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [88].

Zhang et Han [107] ont montré aussi, en étudiant l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, que lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice est inférieur à 15 %, la viscosité de la pâte est réduite.

II.6.1.4. Effet des adjuvants

Généralement les fluidifiants diminuent la viscosité du béton ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosités ont la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle modificateur peut aller de simple épaissement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP.

L'ajout de superplastifiant (SP) diminue le seuil de cisaillement mais il n'a pas d'effet sur la viscosité plastique des bétons, alors qu'il pourrait réduire la viscosité plastique de la pâte de ciment. La fluidification des BAP se fait par l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules créant ainsi la défloculation et la dispersion des grains de ciment par répulsion stérique ou par répulsion électrostatique [108] (Figure II.13).

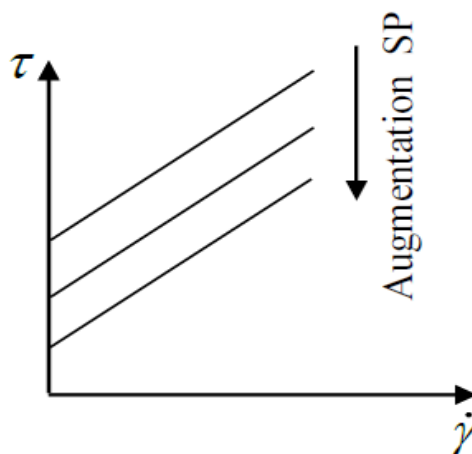


Figure II.13. Rhéogramme illustrant l'influence de SP sur les propriétés rhéologiques des bétons [108].

En abordant l'effet de superplastifiant SP sur la rhéologie des bétons. Bjornstrom et Chandra [109] ont mis en évidence l'action de plusieurs types de SP sur les paramètres rhéologiques où l'action des polycarboxylates est très significative comme l'illustre la Figure II.14.

Les travaux de Husson [110] sur l'effet de divers superplastifiants sur le seuil de cisaillement rapportent que l'ajout de superplastifiant de type Polycarboxylate (PCE) diminue le seuil de cisaillement plus que divers superplastifiants.

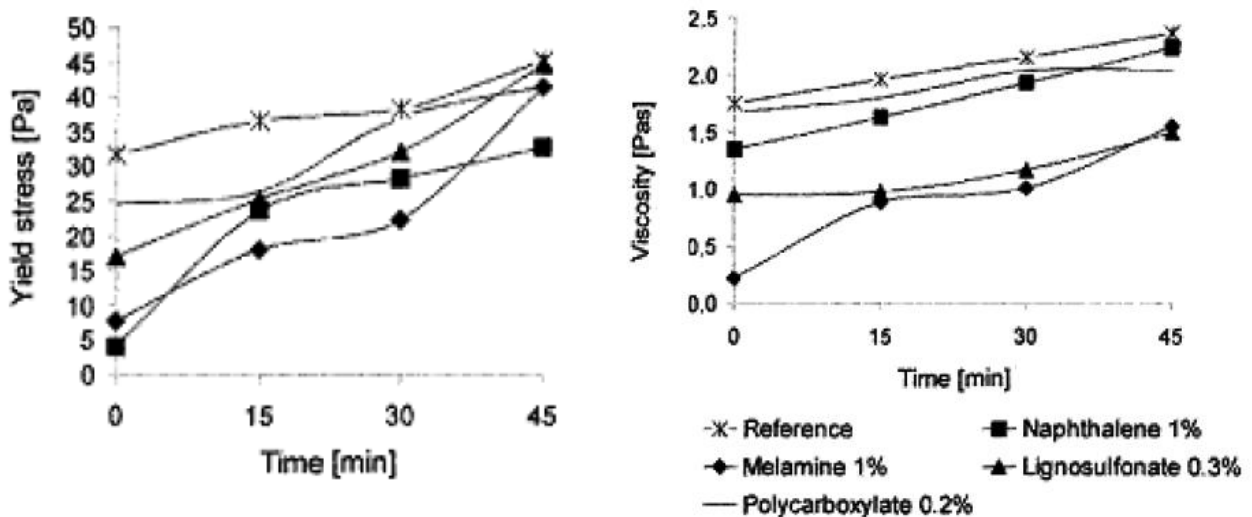


Figure II.14. Variation du seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction du temps confectionnée avec différents types de superplastifiant [110].

Hu [111] a étudié l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. Les résultats représentés sur la Figure II.15 montrent que le superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, par contre son effet sur la viscosité reste modeste après un certain dosage.

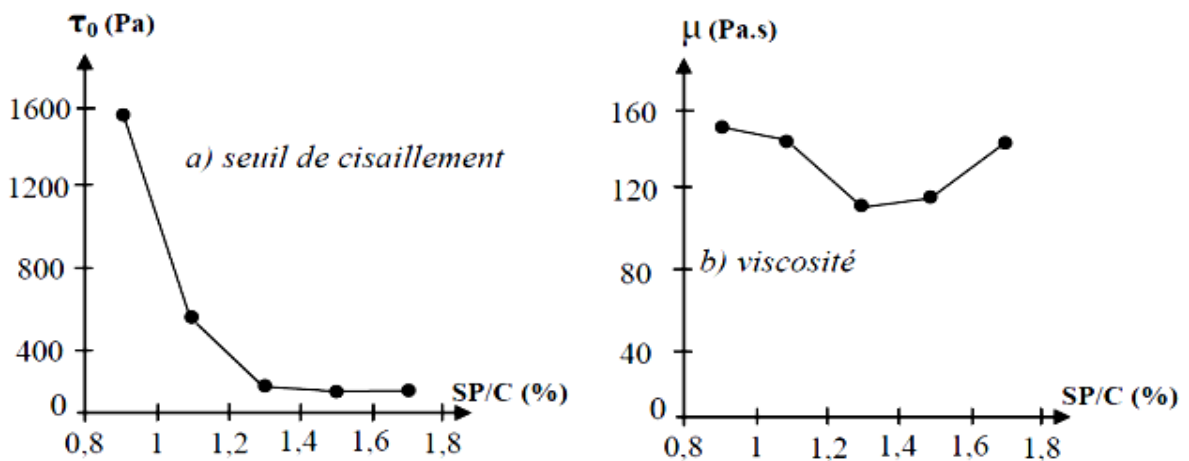


Figure II.15. Effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques [111].

II.6.1.5. Effet des fibres

Les études de l'effet de l'ajout de fibres sur la rhéologie du béton frais montrent que le comportement des bétons est Binghamien. Les résultats montrent que lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente.

Bentegri et al [112] à trouvent que l'introduction des fibres polypropylènes (FL) dans le béton sans adjuvant, induit une augmentation de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement (Figure II.16.a). Cette augmentation est proportionnelle au dosage en fibres. Par ailleurs la viscosité plastique du béton fibré avec adjuvant est trois fois inférieure à celle du béton sans adjuvant.

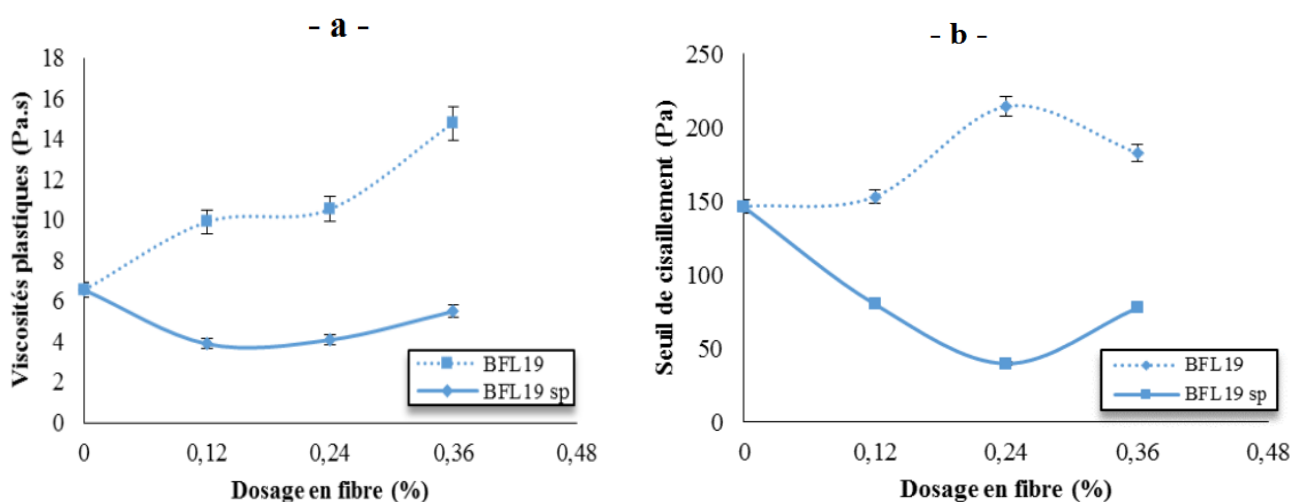


Figure II.16. Propriétés rhéologiques : viscosité plastique (a) et seuil de cisaillement (b) des bétons fibrés avec et sans adjuvant en fonction de dosage en fibre [112].

II.6.1.6. Effet du temps

Le temps occupe une place particulière étant donné qu'il s'agit du seul facteur qui ne fait pas intrinsèquement partie de la composition du béton. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. Quand cette limite est dépassée, le béton perd sa maniabilité et son comportement rhéologique est modifié [88].

La Figure II.17 permet de visualiser l'influence de l'hydratation sur le profil des courbes du seuil de cisaillement en fonction du temps écoulé. Il s'agit de 3 bétons similaires, à base de ciment Portland, testés à 4 différentes températures. Il est possible d'observer l'augmentation rapide du seuil de cisaillement pour un béton à 20 C° comparativement à un béton à 10 C°. Cette augmentation serait directement reliée à l'hydratation [113].

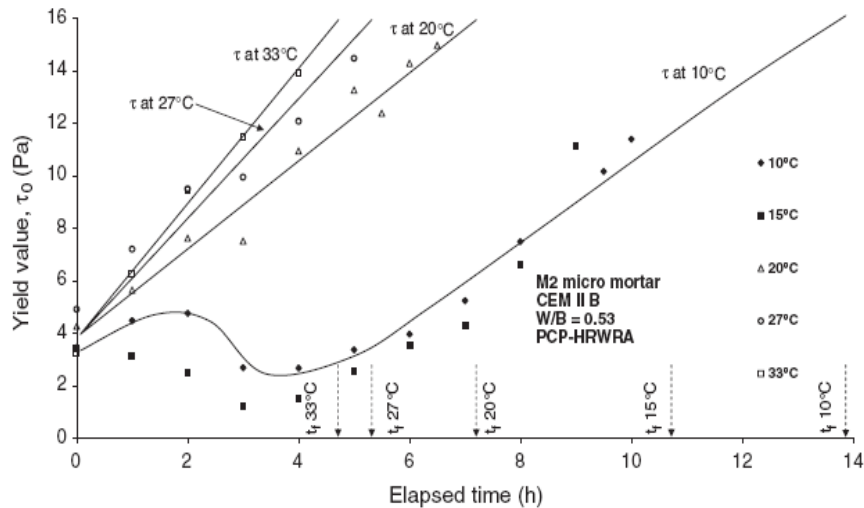


Figure II.17. Influence de la température sur l'évolution du seuil de cisaillement [113].

II.6.1.7. Effet de la température

La température est l'un des facteurs susceptible d'avoir une forte influence sur les propriétés rhéologiques de nombreux matériaux cimentaires, lié directement à leurs compositions chimiques. Une température élevée accélère la vitesse de formation des hydrates. Cette croissance des hydrates diminue la fluidité du mélange à cause de la formation des microstructures incassables par la puissance du malaxeur. Cela se traduit par un accroissement du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. Cet effet est plus accentué lorsque E/C décroît [114].

Griesser [115] montrent que les ciments riches en C_3A se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement. En général, le seuil de cisaillement augmente avec la température, cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment C riche en C_3A (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. Le coefficient de viscosité relative a tendance à diminuer avec l'élévation de température et semble relié au type de superplastifiant utilisé comme le montre la Figure II.18. La viscosité augmente au cours du temps et autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30° C.

Golaszewki et Szwabowski [116] ont étudié l'effet de la température sur le comportement rhéologique des mortiers. Ces analyses ont mis en évidence une augmentation une forte influence du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique lors que la température s'élève.

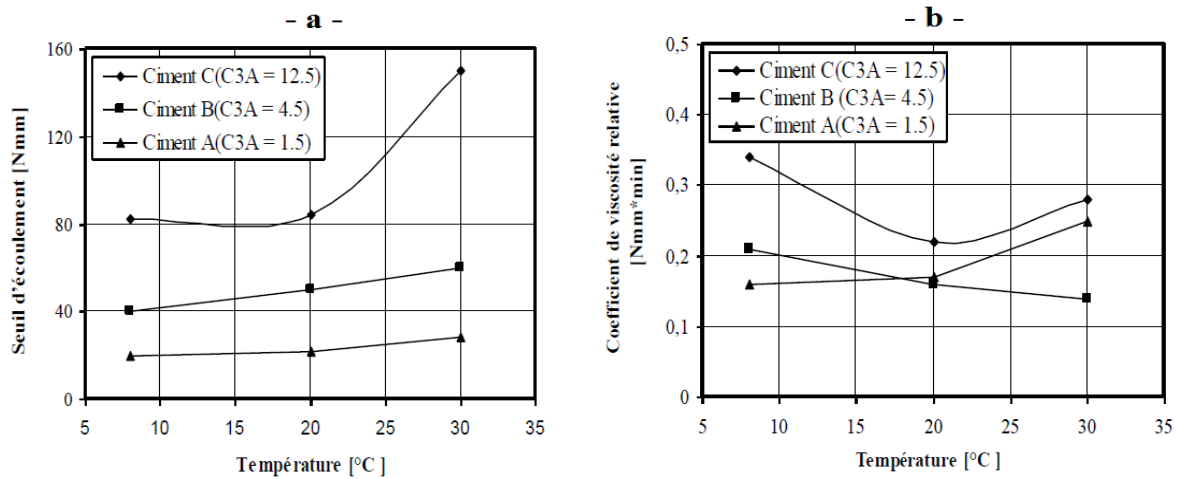


Figure II.18. Propriétés rhéologiques : seuil de cisaillement (a) et viscosité plastique (b) pour différentes pates de ciments en fonction la température [116].

Helnan et al [117] a détecte deux zones distinctes de la viscosité plastique des BAP délimitées par une température critique de 24°C. Il a remarque que la viscosité plastique diminue entre 11.3° et 24°C puis augmente entre 24° et 30.7°C. Par contre, le seuil de cisaillement augmente quand la température augmente et présente un maximum a 21°C. Il a aussi note que l'effet des agents de viscosité est plus accentue pour des températures inferieures a 24°C (Figure II.19).

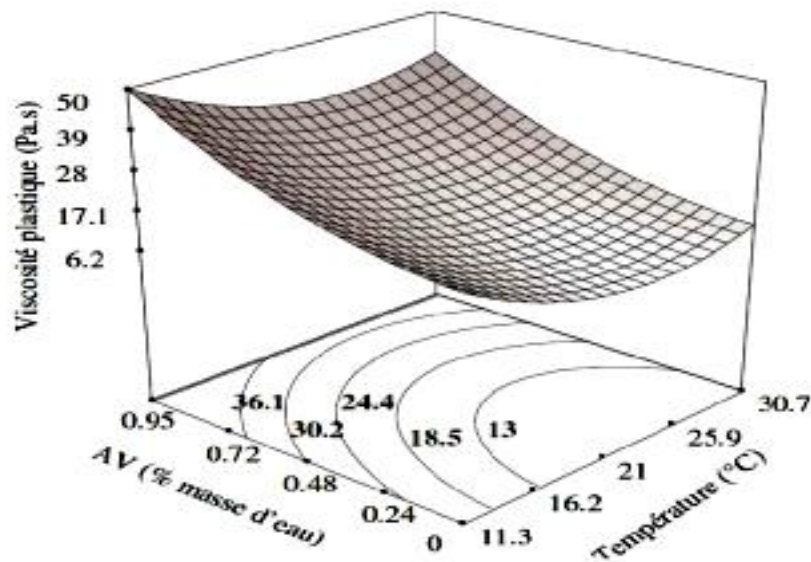


Figure II.19. Surfaces et courbes iso-réponses de viscosité plastique en fonction de la température et du dosage en agent de viscosité [117].

II.6.1.8. Malaxage

Le malaxage est une opération visant à homogénéiser le mélange de béton par l'entremise d'une action mécanique. Les différents constituants de la formulation n'ayant pas les mêmes densités, il peut être difficile de rendre le mélange homogène (Yang et Jennings, 1995) [118]. En même

temps, la période de malaxage permet de rendre le béton plastique, donc d'obtenir une consistance adéquate. Pour obtenir cette plasticité, le malaxeur doit apporter suffisamment d'énergie pour une durée suffisante.

De plus, le malaxage a comme rôle, lorsque cela est requis, d'entraîner de l'air dans le mélange (Lemay, 2000) [119]. Lors du malaxage, un culbutage est exercé sur la masse de béton malaxé. Cette action produit un réseau de bulle d'air en emprisonnant dans un premier temps des bulles d'air pour ensuite, en présence d'un agent entraîneur d'air, les réduire et les stabiliser en bulle plus petite.

Le choix d'un malaxeur dépend de la nature des constituants à mélanger. Les liens se créant au sein de la pâte de ciment doivent être brisés pour permettre un écoulement. La force requise pour briser ces liens dans la structure est transmise à travers le fluide durant le processus de malaxage.

II.7. Les avantages des bétons fluides

Les bétons fluides entraînent de nombreux avantages, on cite :

a) Avantages techniques

- ✓ Rapidité et facilité de la mise en œuvre du béton ;
- ✓ La qualité des parements et arase systématique, qui permettent la réalisation des éléments de forme complexe ;
- ✓ Bétonnage en milieux fortement ferraillés ;
- ✓ Remplissage des parties difficilement accessibles.

b) Avantages économiques

- ✓ La réduction du coût de la main d'œuvre nécessaire à la vibration et du temps de bétonnage
- ✓ La réduction des besoins en matériels ;
- ✓ La réduction des nuisances sonores dues à la vibration ;

c) Avantages écologiques

- ✓ Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- ✓ Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [120,121].

Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton.

Les bétons fluides présentent plus d'avantages que d'inconvénients. L'inconvénient majeur est la poussée latérale sur le coffrage due à la fluidité du béton. Le choix d'un domaine de maniabilité

adéquat et l'utilisation de coffrages étanches et bien dimensionnés pour reprendre les charges horizontales du béton fluide sont préconisés pour pallier à ce problème. Le béton fluide peut présenter un risque élevé de ségrégation lorsque le mélange n'est pas bien effectué. De plus, son coût est un peu plus élevé.

II.8. Conclusion

Cette étude bibliographique est une revue de documentation sur la reconnaissance des bétons fluides.

Nous avons défini les paramètres rhéologiques essentiels qui concernent le comportement rhéologique et les types de comportement associé des matériaux cimentaires, aussi nous avons cité les principaux tests empiriques qui sont caractérisés l'ouvrabilité d'un béton autoplaçant. Les propriétés rhéologiques obtenues à l'aide des rhéomètres.

De nombreuses études montrent que le comportement rhéologique du béton fluide à l'état frais est influencé par les paramètres de formulation, des effets du rapport E/C, type de ciment, adjuvants organiques, et les additions minérales, ainsi la température imposée avec le temps de malaxage.

CHAPITRE III :
MATÉRIAUX ET MÉTHODES D'ESSAIS

III. MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

III.1. Introduction

Les performances des bétons dépendent essentiellement de la qualité des différents constituants, qui rentrent dans leurs compositions. Nous présentons dans ce chapitre les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail à savoir le gravier, sable, ciment, fumé de silice, adjuvant, et fibres métalliques.

La plus part des essais d'identification sont réalisés au niveau de laboratoire de matériaux du département de génie civil- université de Djelfa et au niveau de L.N.H.C Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction Sud-Est unité régionale Djelfa. L'analyse par diffraction aux rayons-X est effectuée au niveau du plateau techniques en analyses physico-chimiques (PTAPC-Laghout).

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Gravier

Le gravier utilisé provient d'une roche calcaire de la région de Djelfa. Pour la formulation de notre béton on a choisi deux fractions, $G_{3/8}$ et la fraction $G_{8/16}$. Le gravier est le constituant le plus important des bétons et sa qualité est, donc, un facteur déterminant pour la qualité du béton résultant. Le Tableau III.1 résume les principales propriétés du gravier utilisé, la Figure III.1 présente leurs courbes granulométriques.

Tableau III.1. Propriétés du gravier utilisé

Propriété	$G_{3/8}$	$G_{8/16}$
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1358	1480
Masse volumique absolue (Kg/m^3)	2660	2670
Coefficient los Angeles LA (%)	22.9	20.7
Coefficient d'absorption Ab (%)	2.12	2.12

III.2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire, de dimensions 0/5mm extrait de (Oued Messâd) à 80 Km au sud de Djelfa-Algérie et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région. C'est un sable moyen ayant un module de finesse d'environ 2,34 et une masse volumique absolue de $2,64 g/cm^3$. Les autres propriétés physiques sont présentées dans le Tableau III.2.

La courbe granulométrique du sable utilisé présentée graphiquement dans la Figure III.1, montre que la granularité est continue, étalée et assez régulière, ce qui représente une répartition assez homogène des classes granulaires.

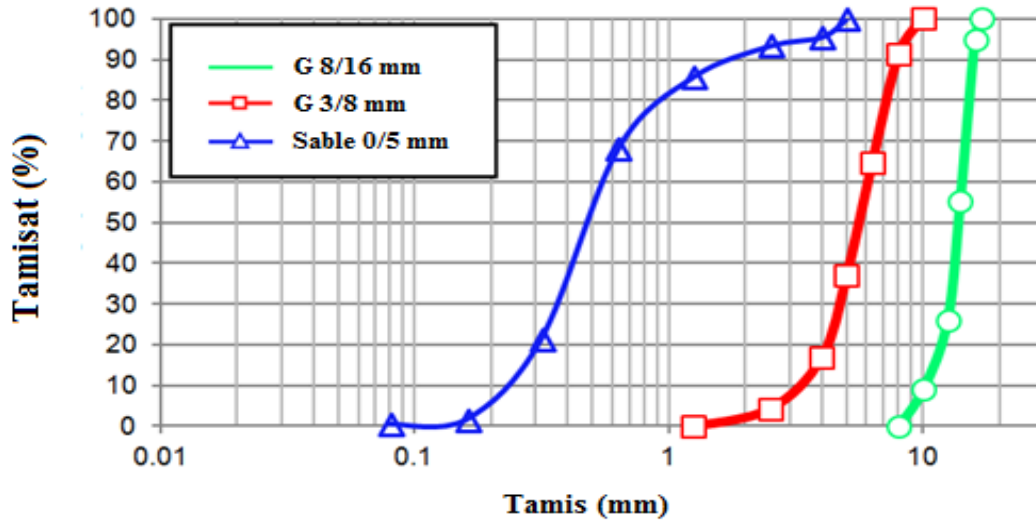


Figure III.1. Courbes granulométriques des granulats.

La courbe montre que la granularité du granulat est monotone et croissante. Il n'existe pas de palier sur cette courbe, ce qui indique que le granulat utilisé dans notre étude est un granulat continu.

Dans la figure de l'analyse par diffraction aux rayons X (Figure III.2), on aperçoit clairement les pics de quartz ce qui montre que la nature du sable SA est essentiellement siliceuse.

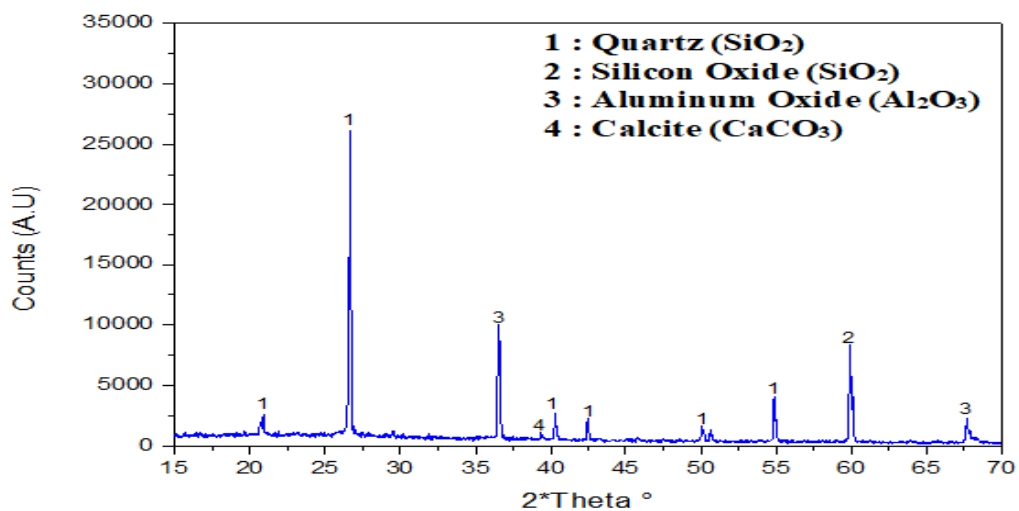


Figure III.2. Analyse par DRX du sable.

Tableau III.2. Propriétés du sable utilisé

Propriété	Sable 0/5
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1520
Masse volumique absolue (Kg/m ³)	2640
Equivalent de sable (%)	77
Module de finesse	2.34
Coefficient d'absorption Ab (%)	0.64

III.2.3. Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude. Il s'agit d'un ciment portland de classe CEM I 42.5R à usage général qui répond à la norme Algérienne (NA442) [122], ce ciment est destiné pour les bétons à hautes performances selon la fiche technique (Annexe -A-).

Ses caractéristiques physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques sont regroupées dans les Tableaux III.3, III.4 et III.5 respectivement. L'analyse chimique du ciment menée par rayon X met en évidence l'existence des éléments de la composition minéralogique (Figure III.3). Néanmoins, cette analyse à un aspect qualitatif et non quantitatif. Cette analyse confirme l'existence des C3S, C2S, C3A et C4AF.

Tableau III.3. Propriétés physico-mécaniques du ciment

Caractéristiques	CEM I 42.5 R
Densité spécifique (kg/m ³)	3140
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Début de prise (min)	150 – 190
Fin de prise (min)	220 – 250
Résistance à la compression (MPa)	2 Days 20 – 29
	28 Days 42.5 – 52.5

Tableau III.4. Composition chimiques du ciment

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SrO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	SO ₃	Loss
Teneurs (%)	20.54	4.45	3.41	64.10	3.01	0.67	0.18	0.06	0.25	0.15	0.02	2.22	1.2

Tableau III.5. Composition minéralogique du ciment

Élément	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur (%)	70.02	6.07	6.02	10.31

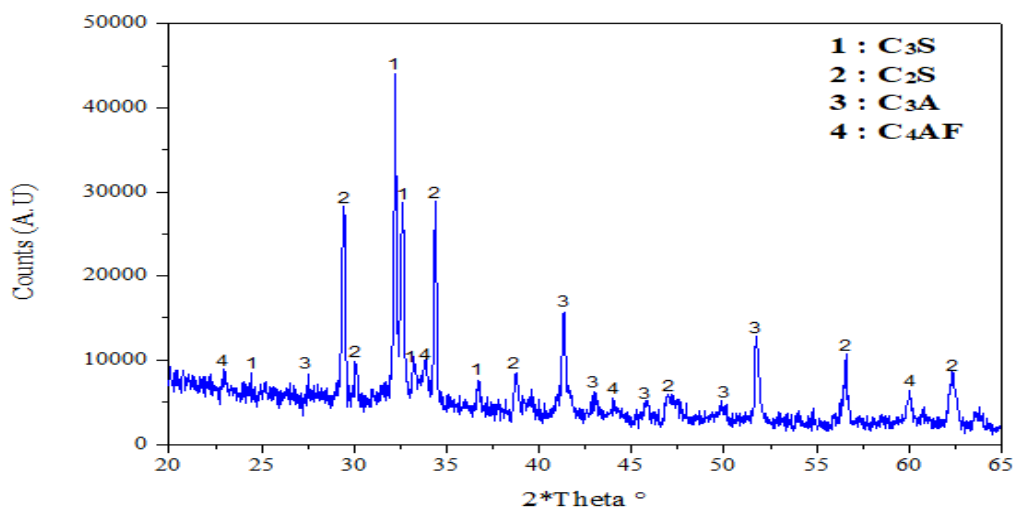


Figure III.3. Diagramme de DRX appliqué sur le CEM I 42.5R.

III.2.4. Fumée de silice

La fumée de silice est utilisée dans la composition du béton pour atteindre des performances élevées. La fumée de silice utilisée est un ajout à base de micro-silice composée de plus de 85% de silice (SiO_2), 0.29% de SO_3 et moins de 0.1% de Cl^- . Elle est commercialisée par la société algérienne Sika El-Djazair sous le nom de Condensil S-95 DP (Annexe -B-) répondant aux exigences de la norme ASTM C1240 [123].

La taille moyenne de ces particules est inférieure à $0.1\mu\text{m}$. Dans un système cimentaire, les particules de la fumée de silice ont un double effet. La réaction pouzzolanique se produit en présence de la fumée de silice pour former d'autres silicates de calcium hydraté C-S-H qui donne la résistance du béton. Aussi, les particules de fumée de silice par leurs petites tailles comblent les espaces vides entre les grains de ciment occupés généralement par l'eau, ce qui donne une structure cimentaire plus compacte avec moins de vides et augmente par conséquent la résistance du béton.

Les compositions chimiques et l'analyse de DRX de fumé de silice sont présentées respectivement au Tableau III.6 et la Figure III.4.

Tableau III.6. Composition chimiques de la fumée de silice.

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SrO	TiO_2	P_2O_5	Cl	SO_3	Loss
Teneurs (%)	90.45	1.25	0.19	0.15	0.29	0.68	0.16	-	0.04	0.26	0.01	0.29	0.04

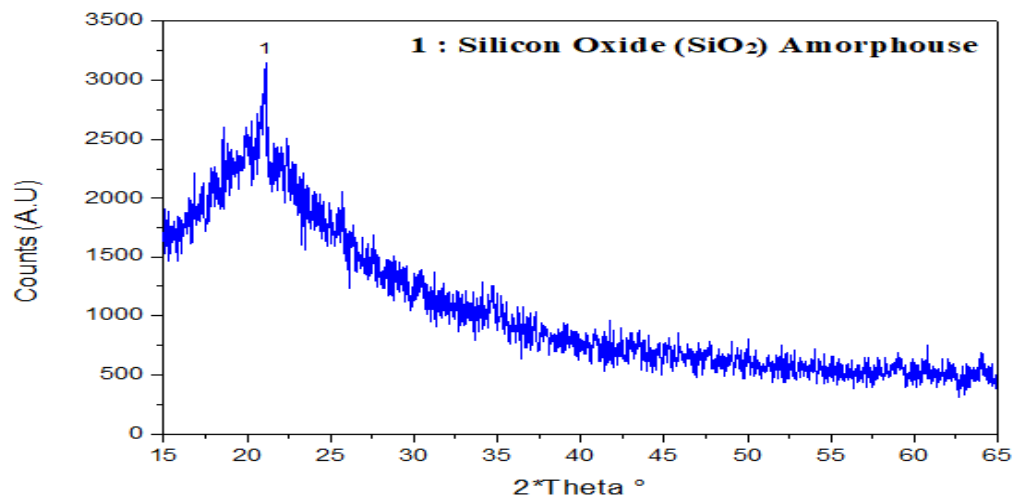


Figure III.4. Diagramme de DRX appliqué sur la fumé de silice.

III.2.5. Adjuvant

Les adjuvants sont des produits qui, ajoutés à moins de 5% du poids du ciment, au moment du malaxage des mortiers et des bétons. Ils améliorent certaines de leurs propriétés.

Dans cette étude nous avons utilisé un seul type d'adjuvant provenant de GRANITEX Oued Smar (Wilaya d'Alger). L'adjuvant est un super plastifiant nommé **MEDAFLOW RE25** (Annexe -C-).

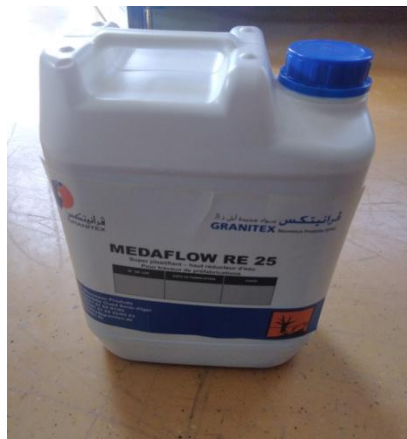


Figure III.5. Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW RE25.

Ce produit est un haut réducteur d'eau, il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas, qui améliorent considérablement les propriétés des bétons, il est compatible avec tous les types de ciments, ses caractéristiques sont présentés dans le Tableau III.7.

Tableau III.7. Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLOW RE25.

Forme	Couleur	pH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Brun clair	7	1,06 ± 0,01	≤ 0,1 g/l	25 %

III.2.6. Eau de gâchage

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : Elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable de l'université de Djelfa, cette eau joue un rôle très important dans :

- L'hydratation du ciment ;
- Au mouillage des granulats (car la pâte de ciment colle mal à des granulats secs) ;
- Le malaxage et la mise en œuvre (améliore la maniabilité du béton).

L'analyse chimique de l'eau a été effectuée antérieurement [124]. Elle montre que la potabilité chimique est de bonne à passable. Elle répond aux exigences de la norme NF EN 1008:2002 [125]. Elle a une température 20 ± 2 °C et un pH=8.04. Le Tableau III.8 représente quelques paramètres de l'analyse chimique de l'eau.

Tableau III.8. Analyse minéralogiques de l'eau de gâchage

Minéralisations globales	Valeur mg/l
Calcium Ca ⁺⁺	104
Magnésium Mg ⁺⁺	23,32
Chlorures Cl ⁻	92,3
Sulfates SO ₄ ⁻	170
Ammonium NH ₄ ⁺	0,04

III.2.7. Fibres

Le rôle des fibres, dans une matrice fragile, est le renforcement et la couture de la matrice après la fissuration, donc elles doivent posséder des caractéristiques satisfaisantes. D'autre part les fibres doivent être inertes dans le milieu cimentaire.

Les fibres utilisées doivent être avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice. Elles doivent conserver leurs propriétés dans le temps et être compatibles.

Pour notre étude on a utilisé les fibres à crochets, commercialisé par la société SIKA en Algérie. Sont appelées (SIKA METAL FIBRES VISCOCHAPE) (Annexe -D-) : ce sont des fibres encollées en plaquettes, fabriquées avec du fil d'acier tréfilé (Figure III.6), Elles comportent un encrage mécanique constitué de crochets aux extrémités. Ce type de fibre contrôle la fissuration

grâce à la reprise des contraintes qui permet de maîtriser l'ouverture des fissures en s'opposant à leur propagation. Les caractéristiques générales des fibres métalliques utilisées dans notre travail sont détaillées dans le Tableau III.9.

Tableau III.9. Caractéristiques de fibres utilisées

Caractéristiques	Valeur
Résistance à la traction (MPa)	> 1100
Densité (kg/m ³)	7800
Longueur (L), (mm)	30
Diamètre (d), (mm)	0.55
Rapport (L/d)	54.55

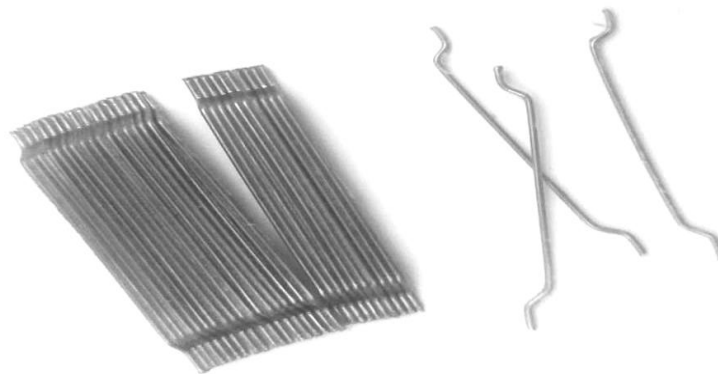


Figure III.6. Fibres métalliques DRAMIX.

III.3. Méthode de formulation

III.3.1. Introduction

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage.

Les différentes méthodes de composition du béton à haute performance fibré BHPF, pour la plus part empiriques, sont basées sur un grand nombre d'études expérimentales qui doivent aboutir à des recommandations utiles à l'ingénieur. La composition des BHPF doit être à chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé.

III.3.2. Méthodologie expérimentale

L'objectif de cette partie de notre travail consiste à obtenir une bonne fluidité de béton à haute performance fibré BHPF (bonne mise en œuvre) avec une bonne résistance mécanique.

La méthode de formulation adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition du béton est celle de l'université de Sherbrooke élaborée par le professeur P.C.Aïtcin et son équipe de recherche [126] (Annexe -E-).

Avant de traiter la méthode de formulation des BHP utilisée à L'Université de Sherbrooke, on commencera par présenter brièvement les définitions et les formules suivantes:

Dans cette partie d'étude on propose une formulation de base d'un béton à haute performance (BHPt) considéré comme formulation de référence (Tableau III.10), avec un rapport E/L = 0.30 fixe pour tout les mélanges, en passant par une optimisation des dosages de super plastifiant et du dosage en ciment. Pour cela, l'approche consiste à cibler une bonne ouvrabilité de départ.

Tableau III.10. Formulation de base pour le béton à haute performance témoin BHPt.

Mélange	SP (%)	FM (Kg/m ³)	E/L	Eau (L/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	FS (Kg/m ³)	G _(3/8) (Kg/m ³)	G _(8/16) (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)
BHPt	1.50	-	0.30	145	439.39	43.94	347.97	646.17	816.02
SP : Superplastifiant ; FM : Fibres métalliques ; FS : Fumée de silice.									

III.3.3. Optimisation de la formulation du BHPF par une modélisation "plan de surface"

Nous allons dans la suite de ce travail faire évoluer la formulation de nos bétons fluides a partir de la formulation de référence en gardant même paramètres, on a choisi d'apprécier l'effet de deux facteurs contrôlés, à savoir le pourcentage de super plastifiant SP et le dosage en fibres métalliques FM.

III.3.3.1. Choix de plan d'expériences

Dans ce cas en utilise la méthodologie de surface de réponse (RSM) qui aide à l'analyse et optimise des réponses qui sont influencées par ces variables. RSM a une variété de conceptions de surfaces de réponse qui peuvent être utilisées [127]. La conception composite centrale (CCD) a été utilisée dans cette étude. Le CCD est une version augmentée du plan factoriel avec des points centraux et axiaux [128].

Dans la présente étude, le logiciel Expert - Design (Annexe -F-) a été utilisé dans la conception expérimentale, l'analyse statistique, la modélisation mathématique et optimisation des variables de processus pour les bétons à hautes performances fluides. La relation et l'interaction entre les

facteurs d'entrée SP, FM et les réponses (propriétés frais et durcies) ont été obtenus en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) [129,130].

La Figure III.7, montre le processus CCD classique pour les variables.

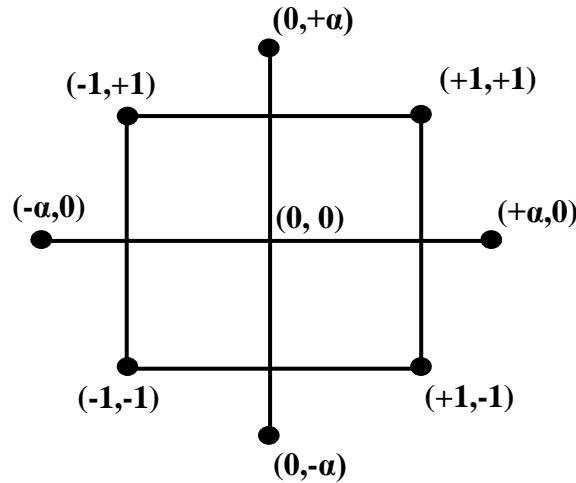


Figure III.7. Conception composite centrale (CCD) pour deux variables [131].

Les points du plan factoriel (\pm) sont représentés par les points aux quatre coins.

Ces points définissent les limites de la zone d'intérêt où l'optimum est supposé exister et ces points seront généralement en dehors de la limite.

Les points de conception axiaux ($\pm\alpha$) sont désignés par les quatre points centraux. Les points axiaux définissent la zone d'opérabilité (le point central est répété 5 fois pour estimer l'erreur expérimentale), la zone d'intérêt se situe à l'intérieur de la zone d'opérabilité.

III.3.3.2. Choix de modèle mathématique

Dans cette étude, les modèles de réponse ont été choisis pour les propriétés fraîches et durcies de BHP fluide avec les facteurs variables comme le SP et FM. En sélectionnant le modèle approprié, les meilleures conditions ont été déterminées, ceci décrit le modèle de surface de réponse.

Les équations quadratiques ont été sélectionnées pour le modèle, qui est aussi décrit dans l'équation (1).

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i<j} \sum_{i<j} \beta_{ji} X_i X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \varepsilon \tag{III-1}$$

Où y représente la fonction de réponse, $\sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \varepsilon$ est l'effet quadratique d'une seule variable, $\sum_{i<j} \sum_{i<j} \beta_{ji} X_i X_j$ est l'effet d'interaction entre deux variables, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ est les coefficients de régression, X_i, X_j est les facteurs étudiés, k est le nombre de facteurs et ε est l'erreur de bruit observée.

Dans ce travail, 13 essais expérimentaux ont été obtenus pour les deux variables SP et FM en utilisant la méthode CCD. le pourcentage en SP prend comme niveaux extrêmes 1.80% et 2.40% avec un dosage de FM allant de 23 kg/m³ à 37 kg/m³ et un taux fixe en fumée de silice FS égale à 10% du poids de ciment, les autres composants de la formulation sont à un niveau constant. Le dosage en liant est considéré comme un facteur constant et fixé à 483.33 kg/m³ de béton (Tableau III.11 et Tableau III.12).

Tableau III.11. Tableau des facteurs ou des paramètres à cinq (05) niveaux

Paramètres	Code	Unité	Niveaux de paramètre codés				
			$\alpha = -1.414$	-1	0	+1	$\alpha = + 1.414$
Superplastifiant	A	%	1.80	1.90	2.10	2.30	2.40
Fibre métallique en acier	B	Kg/m ³	23	25	30	35	37

Tableau III.12. Compositions issues du plan d'expérience

Mélange N°	SP (%)	FM (Kg/m ³)	E/L	Eau	Ciment (Kg/m ³)	FS (Kg/m ³)	G _{3/8} (Kg/m ³)	G _{8/16} (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)
BHPF1	1.90 (-1)	25 (-1)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	761,33
BHPF2	1.90 (-1)	35 (+1)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	761,33
BHPF3	2.30 (+1)	25 (-1)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	757,47
BHPF4	2.30 (+1)	35 (+1)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	757,47
BHPF5	1.80 (-1.414)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	762,29
BHPF6	2.40 (+1.414)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	756,79
BHPF7	2.10 (0)	23 (-1.414)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40
BHPF8	2.10 (0)	37 (+1.414)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40
BHPF9	2.10 (0)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40
BHPF10	2.10 (0)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40
BHPF11	2.10 (0)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40
BHPF12	2.10 (0)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40
BHPF13	2.10 (0)	30 (0)	0.30	145	439.39	43.94	367.5	682.5	759,40

III.4. Procédures des essais

Les compositions issues du plan d'expériences ont été toutes préparées dans des conditions identiques.

III.4.1. Préparation des bétons :

Tous les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur à axe vertical d'une capacité maximale de 70 Litres (Figure III.8), le malaxage s'effectue de la façon suivant :

➤ **Cas d'un béton à haute performance témoin BHPt (sans fibres) :**

- Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable et les fines.
- Malaxer pendant 30 secondes.
- Ajouter de 1/3 d'eau à une vitesse lente pendant 1 min 30 secondes.
- Arrêter le malaxeur et ajouter de 1/3 de super plastifiant à la surface du béton.
- Continuer le malaxage jusqu'à 120 secondes.
- Mettant de 2/3 de mélange restant (eau + super plastifiant) d'une façon uniforme et continuer le malaxage à une vitesse rapide jusqu'à 90 min.

➤ **Cas d'un béton à haute performance fluide fibré BHPF**

Le béton de fibres a été fabriqué dans les mêmes conditions et avec le même appareillage que le béton témoin :

- Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable et les fines.
- Les fibres sont introduites progressivement par petite quantité, en forme de pluie ; pour éviter la formation d'oursins « pelotes ». à chaque ajout, il y a malaxage pendant 10 secondes (3 à 5 opérations) ;
- Ajouter de 1/3 d'eau à une vitesse lente pendant 1 min 30 secondes.
- Arrêter le malaxeur et ajouter de 1/3 de super plastifiant à la surface du béton.
- Continuer le malaxage jusqu'à 120 secondes.
- Mettant de 2/3 de mélange restant (eau + super plastifiant) d'une façon uniforme et continuer le malaxage à une vitesse rapide jusqu'à 90 min.



Figure III.8. Image du malaxeur de béton utilisé.

III.4.2. Confections des éprouvettes et conditions de conservation

➤ *Cas d'un béton à haute performance témoin BHPt (sans fibres):*

Après le malaxage, on remplit les moules à raison de deux couches et vibrer le béton à l'aide d'un vibreur jusqu' à l'apparition d'un léger ressuage, et enfin araser et lisser la surface du béton.

➤ *Cas d'un béton à haute performance fluide fibré BHPF :*

Après le malaxage, on remplit les moules directement, araser et lisser la surface du béton.

Les éprouvettes sont confectionnées, elles sont placées à l'air libre au laboratoire. Après 24 heures, ces dernières sont démoulées et placées soit sous l'eau à une température de $(20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C})$ (Annexe -G-) jusqu' au moment de l'essai, cette procédure est faite pour toutes les compositions et pour tous les essais.

Les éprouvettes confectionnées après étude de l'ouvrabilité de notre béton sont les suivantes : (selon les normes NF P 18 - 404 et NF P 18 - 405) [132].

- Les cubes de $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$ pour les essais de :
 - Compression ;
 - Absorption par capillarité ;
 - Auscultation sonique.
- Les prismes de $7\times 7\times 28\text{ cm}^3$ pour les essais de :
 - Traction par flexion.

III.4.3. Essai sur béton

Deux familles d'essais sont réalisées pour caractériser nos mélanges :

- les essais à l'état frais pour choisir et évaluer la maniabilité du béton ;
- les essais à l'état durci pour déterminer les performances mécaniques du béton.

III.4.4. Essais réalisés à l'état frais

En général, il existe plusieurs tests caractérisant les propriétés rhéologiques des bétons à hautes performances.

Dans cette étude on utilise les deux essais disponibles au niveau de laboratoire pour optimiser et caractériser la consistance de notre béton :

- Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS pour le BHP ;
- Essai de l'étalement pour les BHPF ;
- Essai de la rhéologie.

Pour mesurer la masse volumique du béton frais on utilise ;

- Un récipient cylindrique en acier rigide et étanche à l'eau.

III.4.4.1. Essai de l'affaissement au cône d'ABRAMS de BHP

L'essai d'affaissement est effectué dans le but de déterminer la maniabilité du béton. L'essai utilisé est celui décrit par la norme ASTM C143 [133]. Cet essai consiste à mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm) (voir la Figure III.9, a). On remplit le cône en 3 couches piquées chacune 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le moule est ensuite soulevé avec délicatesse et l'on mesure, aussitôt après, l'affaissement (ou SLUMP).

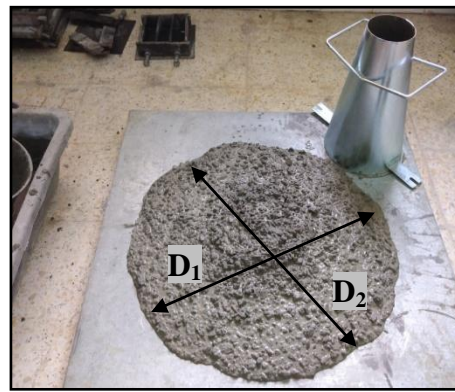
Cette mesure demeure encore aujourd'hui la plus simple et la plus utilisée pour caractériser le comportement rhéologique des bétons de chantier.

III.4.4.2. Essai de l'étalement des BHPF

Le principe de l'essai est de couler le béton frais dans un moule ayant la forme d'un cône tronqué normalisé (cône d'Abrams), et ce sans compactage, puis on soulève le cône lentement dans moins de 5 secondes pour permettre au béton de s'écouler librement. Après l'étalement et l'arrêt complet de l'écoulement, on prend deux lectures perpendiculaires (D_1 & D_2) du diamètre de la galette du béton obtenue, la valeur finale de l'étalement est la moyenne des deux lectures (Figure III.9-b).



a) Affaissement au cône d'ABRAMS.



b) L'étalement de BHPF.

Figure III.9. Mesure de la consistance.

III.4.4.3. Essai de la rhéologie

Pour mesurer le comportement rhéologique des BHPF, on a utilisé un rhéomètre rotatif type Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon vane à quatre pales de 15 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 30 x 30 cm, présenté sur la Figure III.10. Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur.

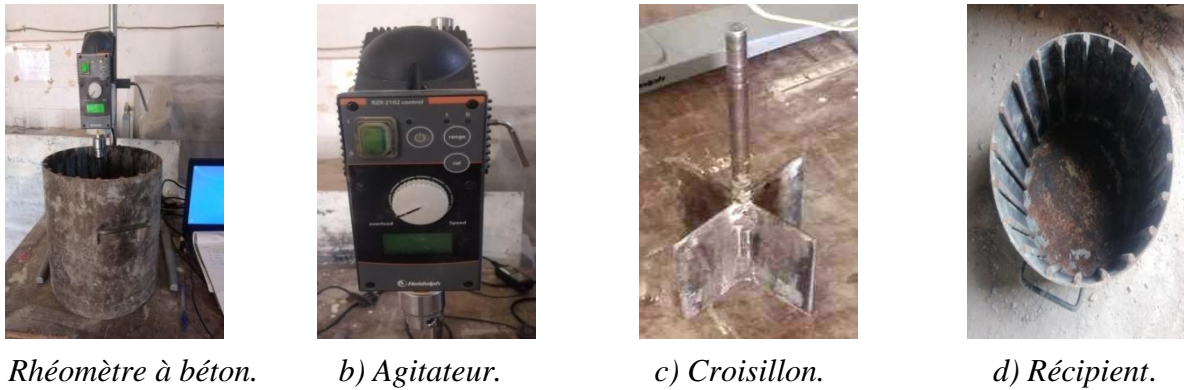


Figure III.10. Dispositif du rhéomètre utilisé.

Le principe de l'essai est de mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre car son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre, ce qui est un avantage pour les matériaux thixotropes comme le mortier.

Le principe de l'essai est de versé le BHP préparé dans le récipient, ensuite fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du béton puis démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié à l'aide du logiciel.

Profil de vitesse imposée

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). La Figure III.11 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

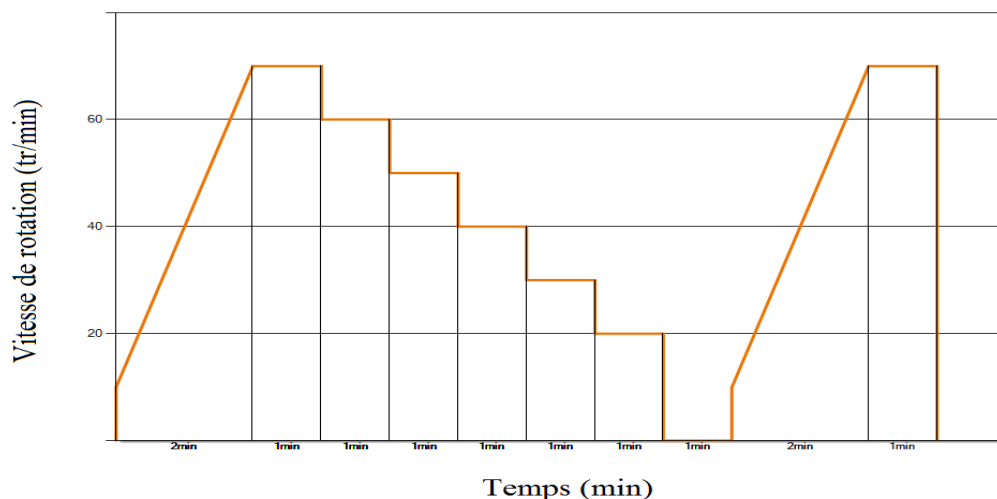


Figure III.11. Profil de vitesse.

III.4.4.4. Masse volumique des BHPF à l'état frais

La mesure de la masse volumique du béton frais consiste à [134] :

- Prendre le poids de récipient à vide, soit M_0 .
- Remplir un récipient d'un échantillon de volume V et de poids M_0 connu par un échantillon du béton frais, qui a subi vibration.
- Araser et lisser les surfaces et prendre le poids de ce récipient du béton soit M_1 .

La masse volumique de béton frais est :

$$\rho_f = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (\text{Kg/m}^3) \quad (\text{III-2})$$

III.4.5. Essais sur le béton durci

Pour calculer les ouvrages, il est nécessaire de connaître les réponses du béton durci aux sollicitations mécaniques susceptibles de lui être appliquées, qu'il s'agisse de sollicitation d'intensité croissantes monotone et de courte durée ou d'intensité constante de longue durée, ou encore cycliques, chacune pouvant être, de plus, mono-axiale ou pluri – axiale.

III.4.5.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 conformément à la norme BS EN 12390-3 [135]. L'écrasement des éprouvettes est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement $2,4 \pm 0,2$ KN/Sec.

La résistance à la compression σ_c est calculée par la formule de la R.D.M suivante :

$$\sigma_c = \frac{F}{S} \quad (\text{III-3})$$



Figure III.12. Schématisation du dispositif de compression.

Avec :

σ_c : Contrainte de compression (en MPa) ;

F : Charge de rupture (en KN) ;

$S (a^2)$: Surface de compression de l'éprouvette ($10 \times 10 \text{ cm}^2$).

III.4.5.2. Résistance à la traction par flexion (flexion 3 points)

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibre car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ces applications. On ajoute des fibres dans la matrice béton pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

C'est l'essai le plus utilisé et le plus connu dans la caractérisation des matériaux. Il permet de reproduire le type de sollicitation en flexion le plus fréquent : la traction.

L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 selon la norme BS EN 12390-5 [136].

Pour une charge totale F , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = \frac{F.L}{4} \quad (\text{III-4})$$

La section $S (=B^2)$ pour module d'inertie $\frac{I}{v} = \frac{B^3}{6}$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est :

$$f_t = \frac{M.v}{I} = \frac{6.M}{B^3} \quad (\text{III-5})$$

Toutefois, la comparaison des résistances obtenues en traction-flexion avec celles mesurées en traction directe ou par fendage montre que ces dernières sont en général et en moyenne inférieures de 40 % environ par rapport aux premières ; ceci pour s'expliquer par la plastification du béton dans la phase de pré rupture : ne sont alors plus valable les lois de l'élasticité qui donnent :

$$\sigma = \frac{3,6.M}{B^3} \quad (\text{Proportionnalité des contraintes et des déformations}) \quad (\text{III-6})$$

On affecte donc d'un coefficient 0,6 les valeurs trouvées en traction-flexion et le calcul dans ce cas se fait par la formule :

$$\sigma_t = \frac{3,6.M}{B^3} \quad (\text{III-7})$$

La machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/sec} \pm 10 \text{ N/sec}$.

La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la Figure III.13.

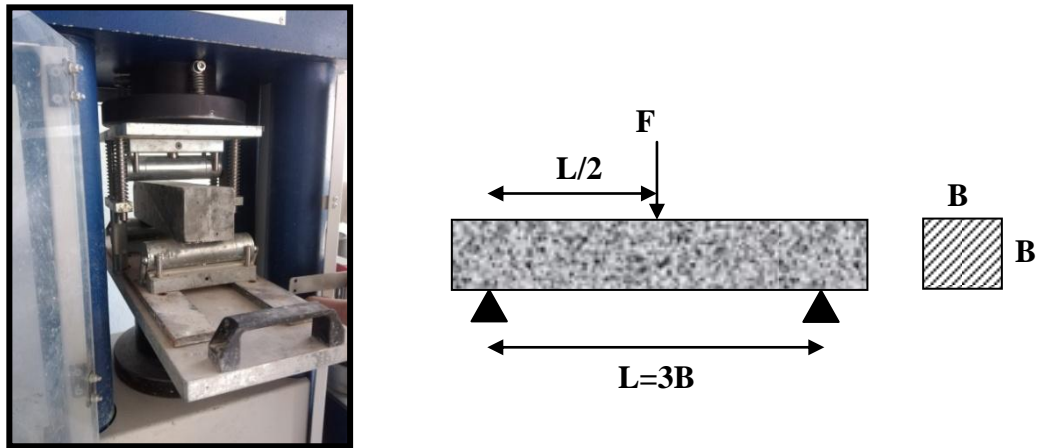


Figure III.13. Schématisation du dispositif de flexion 3 points.

III.4.5.3. Essai de l'absorption capillaire (sportivité)

La capacité d'absorption d'eau d'un béton, donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du béton durci : plus le béton est compact plus sa capacité d'absorption est faible est donc plus il est étanche.

L'absorption capillaire ou la sportivité est la capacité d'un béton non saturé à absorber de l'eau dans son réseau capillaire sans pression hydraulique. Cette propriété est traduite par le coefficient de sportivité (S) qui est influé de plusieurs facteurs tels que l'âge du béton, la composition, la porosité, le temps d'immersion, la cure etc [124].

La sportivité (S) des BHP testés est mesurée après 28 jours de la cure des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm³ dans l'eau. Avant de mesurer la sportivité, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à environ de 105°C jusqu'à l'atteint d'une masse constante afin d'éliminer l'eau emprisonnée dans les pores capillaires.

L'essai de sportivité consiste à mesurer l'augmentation en masse d'une éprouvette en béton due à l'absorption après avoir immergé partiellement dans un bac d'eau de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que dans une hauteur de 5mm. La face inférieure de l'éprouvette est appuyée sur des supports et les faces latérales sont imperméabilisées par une résine époxydique afin d'avoir seulement une surface en contact avec l'eau et d'assurer une absorption unidimensionnelle à travers la face inférieure qui touche l'eau. La Figure III.14 représente le schéma de l'essai.

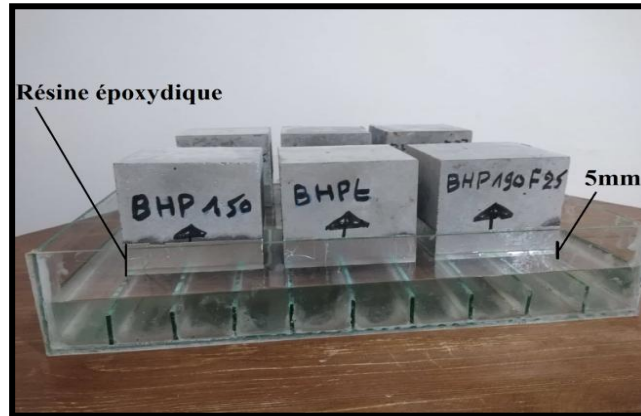


Figure III.14. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire (Sorptivité).

L'absorption capillaire est caractérisée par le coefficient de sorptivité (S) tel que:

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad (\text{III-8})$$

Avec :

S : le coefficient de sportivité en $(\text{cm}/\text{sec}^{0.5})$;

Q : le volume de l'eau absorbée en cm^3 ;

A : la surface en contact avec l'eau en cm^2 ;

t : le temps écoulé en secondes ;

III.4.5.4. Essais d'auscultation dynamiques

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion comme le montre la Figure III.15 [52].



Figure III.15. Appareil d'Auscultation dynamique (ultrason).

Cet essai est réalisé conformément à la spécification de la norme NF P 18-418 [137]. Il est effectué sur des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³.

Après avoir actionné l'appareil on lit le temps de propagation en micro-seconde (µsec). La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour calculer la vitesse de propagation à l'aide de l'expression suivante :

$$V = \frac{s}{t} \cdot 10^6 \quad (\text{III-9})$$

Avec :

V : La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton en m/sec ;

s : La distance entre les têtes en m.

t : Le temps de propagation en µsec ;

Pour un béton normal on enregistre une vitesse du son variant entre 4000 à 4800 m/sec.

A partir de la vitesse de propagation du son, on peut déterminer quelques paramètres intéressants, à titre d'exemple, module d'élasticité dynamique, la résistance à la compression.

Tableau III.13. Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions [52]

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4575	Excellente
3660 à 4575	Bonne
3050 à 3660	Douteuse
2135 à 3600	Mauvaise
Inférieure à 2135	Très mauvaise

III.4.5.4.1. Module d'élasticité dynamique

A partir de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique E_d selon l'expression suivante [52].

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (\text{III-10})$$

Avec :

V : représente la vitesse des ondes, exprimée en Km/s ;

γ : La masse volumique du béton, exprimée en kg/m³ ;

ν : Coefficient de poisson du béton (0.15 pour un béton à haute résistance) ;

E_d : Module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa.

III.4.5.4.2. Résistance à la compression

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse de propagation des impulsions. Mais il n'existe pas encore de relation unique valable pour tous les bétons [52]. Pour les bétons étudiés dans notre recherche on admettra que la résistance et le module d'élasticité dynamique sont liés par la relation (III.11).

$$\sigma_c = 16,7 \cdot \exp\left(\frac{E_d}{122500}\right) \quad (\text{III-11})$$

Avec :

σ_c : Résistance à la compression (MPa) ;

E_d : Module d'élasticité dynamique (MPa).

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation des bétons d'étude (BHP), et différents essais réalisés à l'état frais tel que l'essai d'ouvrabilité et de rhéologie, des essais à l'état durci comme les résistances mécaniques.

Les conclusions qu'on peut tirer de la caractérisation de ces matériaux sont :

- ✓ Le gravier utilisé est un gravier concassé de la région de DJELFA, d'origines calcaires compactes et dures LA < 40%, avec un coefficient d'absorption d'eau est valable Ab < 5%. Les deux fractions de gravier G_{3/8} et G_{8/16} ont une granulométrie continue avec une courbe un peu serrée pour la fraction G_{8/16}.
- ✓ Le sable alluvionnaire d'Oued Messâd, est caractérisé par une granulométrie étalée qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires avec un taux d'absorption d'eau faible.
- ✓ Le ciment utilisé (BISKRIA), est un ciment portland de classe CEM I 42.5R à usage général avec une surface spécifique moyenne, et de prise satisfaisante aux spécifications des ciments courants.

Ces matériaux mis à notre disposition ont des propriétés conformes aux normes en vigueur et convient parfaitement à notre objectif notamment la formulation des bétons à hautes performances.

L'autre étape sera basée sur l'optimisation de la formulation de ce type de béton où nous allons présenter les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans

d'expériences (plan de surface) sera utilisée afin de comprendre le rôle joué par les différents paramètres étudiés (SP et FM) sur les propriétés de béton à haute performance fluides BHPF.

CHAPITRE IV :
ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

IV. ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

Dans cette partie nous présentons les résultats expérimentaux, de la formulation d'un BHPF, relatifs au plan d'expériences appliqué. Ces résultats nous permettent par la suite d'établir des modèles mathématiques décrivant les effets des paramètres de formulation étudiés à savoir le dosage de superplastifiant (SP), et le dosage de fibres métalliques (FM) sur la maniabilité, la résistance à la compression et la résistance en flexion des BHPF.

IV.1. Résultats des essais sur les BHP

Le tableau ci-dessous, fournit les résultats des caractéristiques rhéologiques et mécaniques issus du plan d'expériences du béton à haute performance témoin (BHPt) et autres fluides renforcés par des fibres métalliques (BHPF).

Tableau IV.1. Caractéristiques issus du plan d'expériences pour différents BHP

Mélange N°	SP (%)	FM (Kg/m ³)	Aff (cm)	Eta (cm)	R _{C7} (MPa)	R _{C14} (MPa)	R _{C28} (MPa)	R _{f7} (MPa)	R _{f14} (MPa)	R _{f28} (MPa)
BHPt	1.50	-	15	-	70	75	82	4.00	4.18	4.50
BHPF1	1.90 (-1)	25 (-1)		49	79	87	93	5.30	5.90	6.54
BHPF2	1.90 (-1)	35 (+1)		40	65	70	77	5.95	6.58	7.21
BHPF3	2.30 (+1)	25 (-1)		51	78	85	89	5.82	6.52	7.30
BHPF4	2.30 (+1)	35 (+1)		44	70	78	85	6.25	7.05	7.53
BHPF5	1.80 (-1.414)	30 (0)		46	73	79	84	5.30	5.82	6.80
BHPF6	2.40 (+1.414)	30 (0)		58	81	87	92	6.20	7.10	7.45
BHPF7	2.10 (0)	23 (-1.414)		55	83	88	97	5.65	6.40	7.05
BHPF8	2.10 (0)	37 (+1.414)		43	68	74	81	6.10	6.82	7.37
BHPF9	2.10 (0)	30 (0)		50	75	82	87	5.60	6.25	7.00
BHPF10	2.10 (0)	30 (0)		50	75	82	87	5.60	6.25	7.00
BHPF11	2.10 (0)	30 (0)		50	75	82	87	5.60	6.25	7.00
BHPF12	2.10 (0)	30 (0)		50	75	82	87	5.60	6.25	7.00
BHPF13	2.10 (0)	30 (0)		50	75	82	87	5.60	6.25	7.00

Aff : Affaissement (cm) ; **Eta** : Etalement (cm)

La préparation et l'analyse des résultats des expériences, réalisés selon les compositions du plan composite (voir Tableau IV.2), sont effectuées à l'aide d'un logiciel statistique (*Expert- Design*).

Tous les coefficients des modèles mathématiques ont été trouvés par une méthode de régression basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés.

Nous présentons ci-dessous les résultats des modélisations effectuées :

IV. 2. Modèles mathématiques

Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R^2), et les probabilités F -value des réponses sont regroupés dans le Tableau IV.2. D'après ce tableau, les modèles retenus des réponses (Etalement, résistance en compression R_{C28} , et la résistance en flexion R_{f28} s'écrivent respectivement comme suit :

Équations finales en termes de facteurs codés :

$$Etal (cm) = +45 + 2.87 * SP - 4.12 * FM + 0.5 * SP * FM + 2.37 * SP^2 + 0.88 * FM^2 \quad (IV-1)$$

$$R_{C28} (Mpa) = +87 + 1.91 * SP - 5.33 * FM + 3 * SP * FM + 0.12 * SP^2 + 0.38 * FM^2 \quad (IV-2)$$

$$R_{f28} (MPa) = +7 + 0.25 * SP + 0.17 * FM - 0.11 * SP * FM + 0.057 * SP^2 + 0.099 * FM^2 \quad (IV-3)$$

Les modèles étant en unités codées, il faut effectuer des calculs afin de les transformer en unités réelles. Dans ce cas, on fait recours au chapitre III. Les interactions doubles d'un facteur (ex : SP^2 , FM^2) indiquent que son influence est quadratique [138].

Tableau IV.2. Analyse de variance (ANOVA) pour toutes les réponses

Réponse	Source	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F-valeur	P-valeur	Remarque
Étalement	Modèle	244.34	5	48.87	6.15	0.0169	Significant
	Résiduelle	55.66	7	7.95			
	Inadéquation de l'ajustement	55.66	3	18.55			
	Pure Error	0.00	4	0.00			
	Total	300.00	12				
R_{C28}	Modèle	293.64	5	58.73	20.50	0.0005	Significant
	Résiduelle	20.05	7	2.86			
	Inadéquation de l'ajustement	20.05	3	6.68			
	Pure Error	0.00	4	0.00			
	Total	313.69	12				
R_{f28}	Modèle	0.86	5	0.17	41.09	< 0.0001	Significant
	Résiduelle	0.03	7	4.18E-003			
	Inadéquation de l'ajustement	0.03	3	9.76E-003			
	Pure Error	0.00	4	0.00			
	Total	0.89	12				

Tableau IV.3. Paramètres statistiques de (ANOVA) pour toutes les réponses

Réponse	R ²	R ² Ajusté	Coefficient de variation %	Écart type	Précision adéquate	PRESS
Étalement	0.81	0.68	6.00	2.82	7.30	395.82
R _{C28}	0.94	0.89	1.94	1.69	15.90	142.57
R _{f28}	0.97	0.94	0.91	0.07	19.12	0.21
PRESS: Somme des carrés de l'erreur résiduelle prédite.						

IV. 3. Interprétation des résultats à l'état frais

IV. 3. 1. Essai de l'étalement

La signification de modèle obtenu à partir de l'ANOVA (les Tableaux IV.2- IV.3) montrent le modèle de l'étalement était significatif avec un niveau de confiance de 68%, Il n'y a que 1,69% de chance qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit. Une valeur F de 6.15 et une valeur P <0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Bien que le manque d'ajustement soit significatif, il n'a pas invalidé le modèle à des fins prédictives car R² était d'environ 0,81. Cette valeur pour R² montre que les régressions du modèle n'expliquent pas seulement environ 5% de la variabilité totale.

Les résultats de diagnostic du modèle statistique de la Figure IV.1 ont montré que les points de données sont approximativement un ensemble linéaire, ce qui indique que le modèle a une signification acceptable.

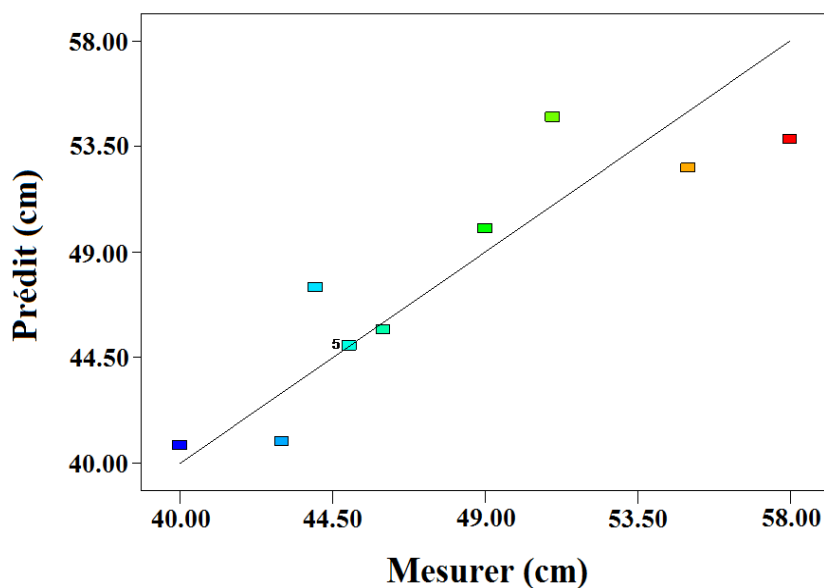


Figure IV.1. Adéquation entre les valeurs de l'étalement mesurées et prédites.

La Figure IV.2 montre les surfaces et les courbes iso- surfaces de l'étalement en fonction de pourcentage de superplastifiant SP et du dosage en fibres métalliques FM.

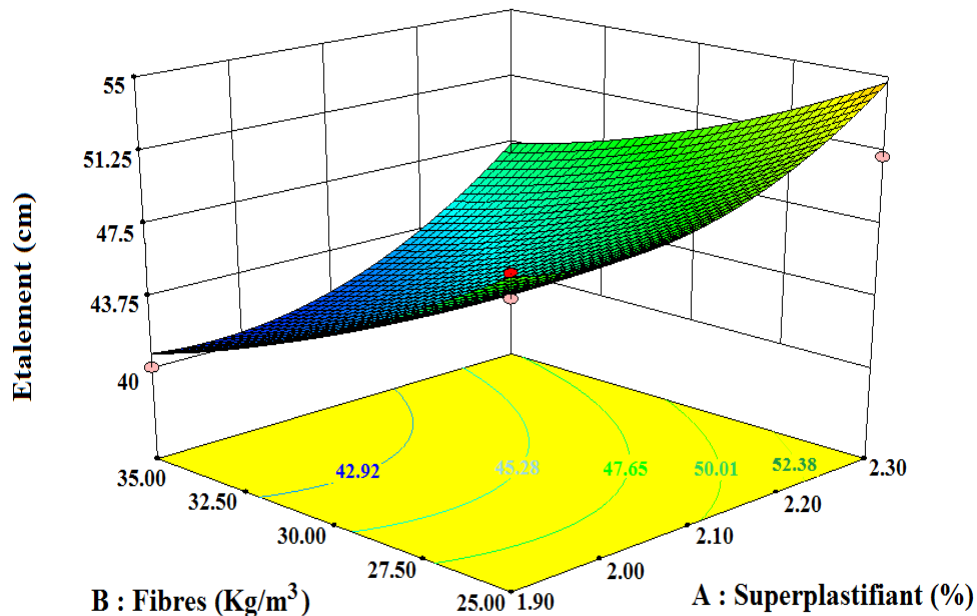


Figure IV.2. Surfaces et courbes iso-réponse de l'étalement (cm) en fonction de % de SP et le dosage en FM.

Nous constatons d'après la Figure IV.2 que l'étalement augmente en fonction de l'augmentation du dosage de superplastifiant SP et diminue en fonction de l'augmentation du dosage de fibres métalliques FM, pour des valeurs constantes du rapport E/L, dans le domaine du plan étudié.

D'autre part l'utilisation des fibres réduit la maniabilité du béton, une diminution proportionnelle avec la quantité des fibres, Cela approuve que l'inclusion des fibres dans les bétons affecte la maniabilité c-à-d. engendre des problèmes de blocage, ce phénomène est du peut être à la forme et nature rigide des fibres métalliques par rapport a la flexibilité des fibres synthétiques comme il a été mentionne par GRUNEWALD [139].

Comme rapporté par Güneyisi, Grabois et al. [140,141], l'augmentation des fibres en pourcentage a un effet négatif significatif sur les propriétés fraîches du béton car les fibres agissent comme un flux de négation de la bande tridimensionnelle. Et par conséquent, agir comme une barrière à l'écoulement, donc le dosage doit être optimisé afin de fournir des performances optimales pour les propriétés fraîches et mécaniques. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs [142,140,143-145], confirmant que l'augmentation de la teneur en fibres métalliques affecte négativement la maniabilité du béton. Aslani et Kelin [146] ont observé les mêmes résultats et ont confirmé que l'augmentation de la teneur en superplastifiant peut aider à surmonter la réduction de la fluidité.

Il faut préciser que les mélanges BHPF étudiés se caractérisent par un étalement variant entre 40 et 58 cm, indiquant que ce type de béton a une consistance qui varie entre celle du béton S3 qui est assez compact et élastique, et celle du béton S5 qui est très fluide ce qui peut le rendre plus maniable et plus facile à placer [147]. De plus, ces bétons se caractérisent par leur très grande déformabilité ; ils sont également connus pour leur facilité de mise en œuvre sous l'effet de leur propre poids, sans vibrations, même dans le cas d'armatures denses, comme l'ont déjà rapporté l'Association Française de Génie Civil et autres auteurs [148].

Le tracé de perturbation de la Figure IV.3 a prouvé que tous les facteurs ont un effet sur l'étalement. On a observé l'influence de A est positive et B est négative, ce qui signifie que l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en fibres, et augmente avec l'augmentation de pourcentage de superplastifiant. On peut en déduire que les fibres avec une quantité faible fournissent un étalement acceptable élevé.

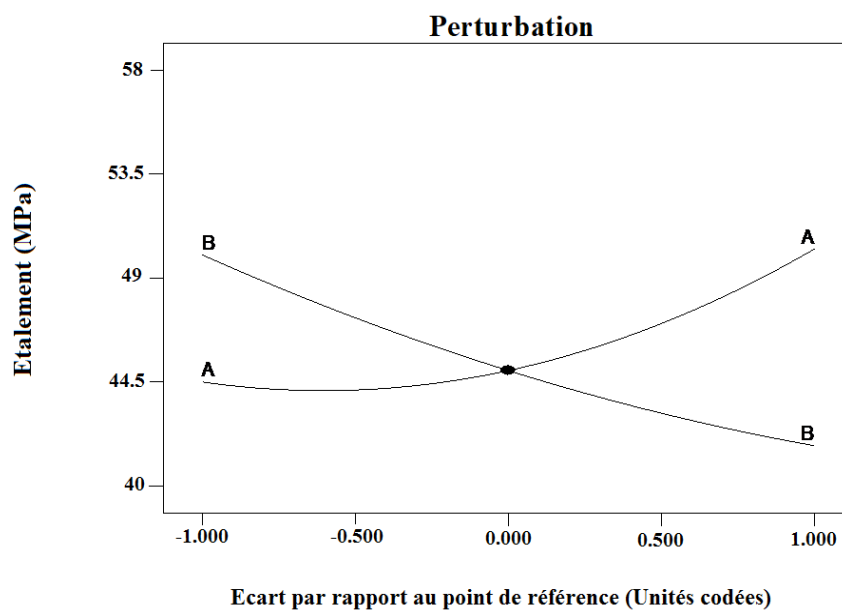


Figure IV.3. Graphique de perturbation pour l'étalement.

IV. 3. 2. L'effet de superplastifiant sur le comportement rhéologique de BHP

La connaissance du comportement rhéologique (contrainte de cisaillement et la viscosité plastique) au cours des deux premières heures après le malaxage est tout aussi importante que la mesure des propriétés initiales (Affaissement/Etalement). Pour cette raison, le présent travail a pour l'objectif l'étude de l'effet de superplastifiant SP sur le comportement rhéologique des bétons à hautes performances BHP, nous avons choisies le béton à haute performance témoin de (BHPT) et le béton à haute performance fluide (BHPF6) de fort dosage en superplastifiant (2.4% de SP).

Le comportement rhéologique des bétons BHP est présenté dans la Figure IV.4 et le Tableau IV.4.

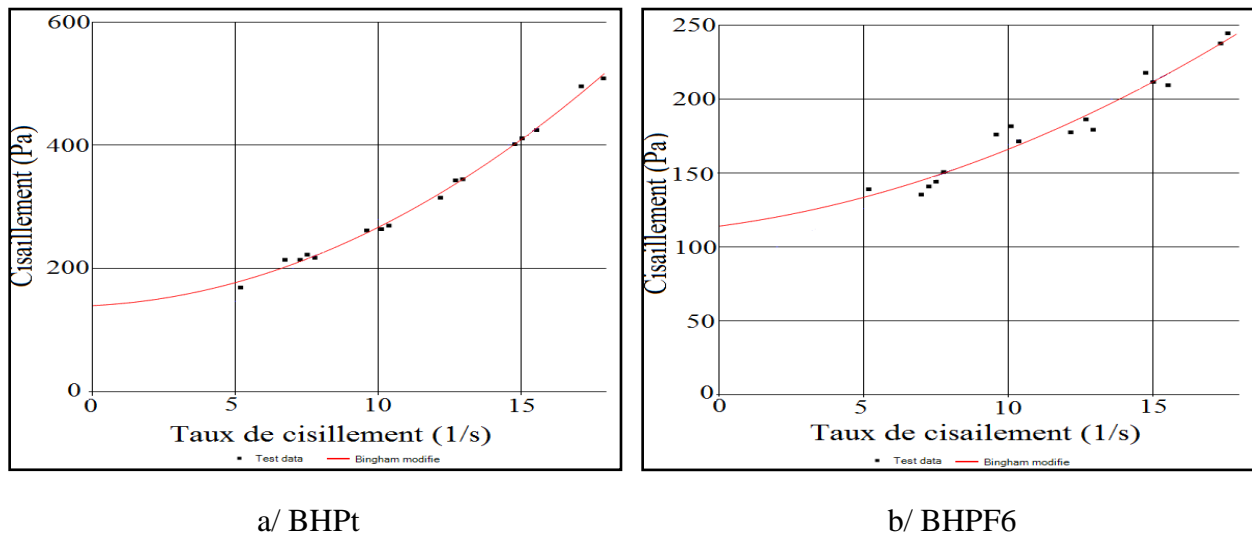


Figure IV.4. Exemple de rhéogramme obtenu avec le rhéomètre Heidolph-RZR 2102 Control Z.

Tableau IV.4. Propriétés rhéologiques des bétons BHP

Type de béton	τ (Pa)	μ (Pa.s)	R^2
BHPt	140.186	2.222	0.996
BHPF6	114.088	2.592	0.95

La comparaison du comportement rhéologique pour les deux bétons permet de constater en premier lieu que le béton fluide plus adjuvanté BHPF6 présente un taux de cisaillement significativement faibles que le béton moins adjuvanté BHPt. Un dosage de 2,4 % de SP a fait baisser le seuil de cisaillement jusqu'à 18,5%. Ceci est inhérent avec le rôle dispersant de l'adjuvant et la diminution des forces de frottement entre les grains lors du cisaillement qu'il engendre. Bonneau [149] explique ce phénomène par la fixation des polymères à la surface des particules solides du ciment par adsorption. Cette adsorption s'effectue sur les phases hydratées du ciment ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floculés et diminue ainsi les frictions inter granulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton ainsi le seuil de cisaillement d'un mélange cimentaire diminue avec l'ajout d'un superplastifiant [150].

Le superplastifiant (SP) diminue le seuil de cisaillement mais a peu d'impact sur la viscosité plastique du béton. Ceci est en accord avec Hassan et al. [151] qui ont confirmé que la quantité de SP dans les mélanges de BAP ne semble pas affecter la viscosité de béton, mais affecte le seuil de cisaillement.

IV. 3. 3. La masse volumique des BHP à l'état frais

Les résultats de la masse volumique du béton frais pour différents types du béton à haute performance sont présentés dans le Tableau IV.5.

Tableau IV.5. Résultats de la masse volumique de béton frais pour différents type du BHP

Type de béton	BHPt	BHPF1	BHPF2	BHPF3	BHPF4	BHPF5	BHPF6	BHPF7	BHPF8	BHPF9
ρ_f (kg/m ³)	2417	2429	2454	2448	2471	2443	2464	2425	2487	2457

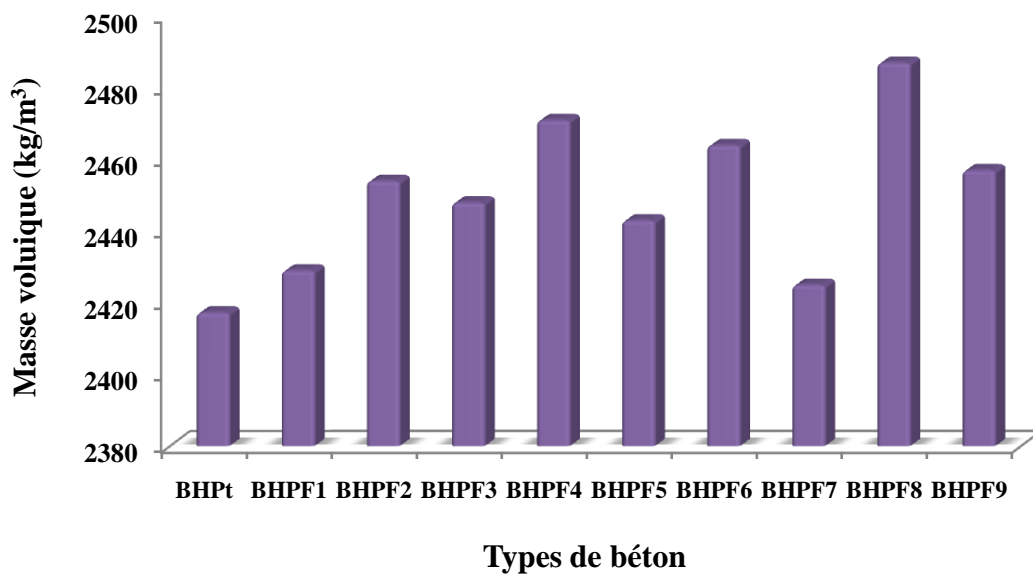


Figure IV.5. Variation de la masse volumique pour différents types du BHP à l'état frais.

D'après les résultats obtenues, nous constatons que la masse volumique augmente en fonction de l'augmentation des pourcentages de fibres introduites et le dosage en super plastifiant dans les compositions de notre béton, cela est dû au fait, que la masse volumique des fibres métalliques est largement supérieur à celle des constituants secs. La même observation marquée par les autres chercheurs [152].

IV. 4. Interprétation des résultats à l'état durci

IV. 4. 1. La résistance à la compression

En ce qui concerne la résistance à la compression, le modèle était le plus significatif avec un niveau de confiance 95% (les Tableaux IV.2-IV.3), La valeur F du modèle de 20,50 implique que le modèle est significatif. Il n'y a que 0,05% de chance qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit. Les valeurs de "P-valeur" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, AB sont des termes significatifs du modèle, Il convient de noter que même si la manque d'ajustement était

significative, R^2 était d'environ 0.94, ce qui implique qu'environ 95% de la variation totale des résultats a été expliquée par le modèle.

Les résultats de diagnostic du modèle statistique de la Figure IV.6 ont montré que les points de données sont approximativement un ensemble linéaire, ce qui indique que le modèle a une signification élevée.

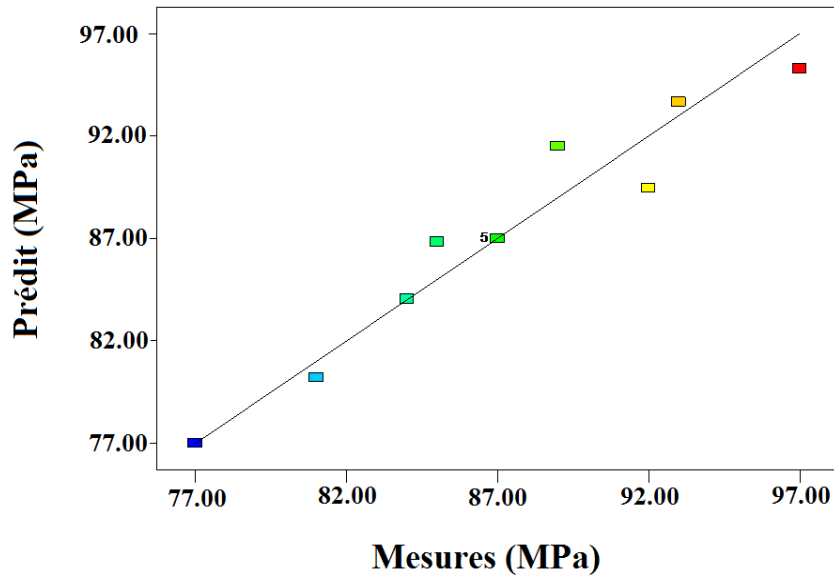


Figure IV.6. Adéquation entre les valeurs de résistance en compression mesurées et prédites.

La Figure IV.7 montre les surfaces et les courbes iso-surfaces de la résistance en compression à l'âge de 28 jours en fonction de pourcentage de superplastifiant SP et du dosage en fibres métalliques FM.

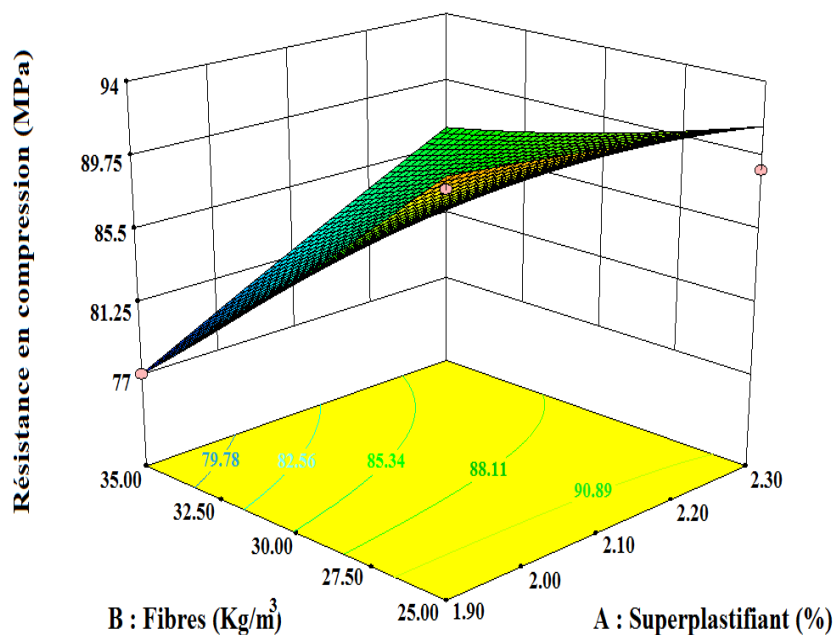


Figure IV.7. Surfaces et courbes iso-réponse de résistance en compression (MPa) à 28 jours, en fonction de % de SP et le dosage en FM.

D'après Cheng Yuan, et al [153], les fibres métalliques ont toujours des résistances à la compression supérieures à celles du béton non fibré. Cela confirme les résultats obtenus et représentés dans le Tableau IV.1. Le comportement mécanique des bétons fluides fibrés PHPF évolue avec le pourcentage de SP et le dosage des fibres métalliques MF sauf les mélanges BHPF2 et BHPF8 qui présente une légère diminution de résistance en compression par rapport au mélange de référence BHPT, cette chute est respectivement de l'ordre de 7% et 1%.

Les autres mélanges présentent une augmentation de résistance en compression, un gain maximal qui est de l'ordre de 18%, Ceci peut avoir une relation directe avec la présence de super plastifiant SP ce qui montre une meilleure compatibilité du MEDAFLOW (RE25) avec ce type de ciment et l'ajout des fibres MF d'un élanement ($\phi < 0.02$) et sa quantité, car ces fibres courtes avec un dosage faible ne posent pas de problème d'enchevêtrement et de formation d'oursins "pilotes" (contraire pour un cas d'exemple des fibres longues avec un pourcentage élevé). Donc, leur présence dans la matrice, vraiment augmente légèrement la porosité, mais ne provoque pas une baisse de résistance, c'est à dire l'incorporation des fibres métalliques avec une bonne orientation et distribution au sein de la matrice, améliore de façon importante la ductilité du matériau, et améliore aussi le seuil de fissuration (Figure IV.8-b), cela confirme les résultats obtenus par [143,154,155].

On peut donc dire que l'incorporation de fibres dans la matrice cimentaire ralentit le développement des microfissures, ce qui induit une augmentation significative de la résistance à la compression ; ceci est en accord avec les conclusions d'autres chercheurs [143,156].

✓ ***Mode de rupture en compression pour différents types du béton à 28 jours***

Le schéma de mécanisme de rupture pour le béton BHPF après l'essai de compression (Figure IV.8-a) est traduit que l'endommagement de béton sans fibres comme défaillance explosive. Tel modèle de défaillance satisfait les modes de défaillance conformément à la BS EN 12390-3. Grâce à un examen visuel, il peut également être vu que la plupart des spécimens cubiques ont montré que la fissuration était à environ 45° à l'axe près des extrémités.

L'efficacité des fibres noyées dans la matrice qui jouent un rôle de ralentisseur du développement des microfissures, ce qui se traduit par une augmentation significative de la résistance à la compression (Figure IV.8-b).



a/ BHPt.



b/BHPF.

Figure IV.8. Mode de rupture des éprouvettes (10x10x10) cm³ par la compression.

Le tracé de perturbation pour la résistance à la compression (R_{C28}) sur la Figure IV.9 a montré que le pourcentage de superplastifiant SP a une influence significative sur R_{C28} car une R_{C28} peu élevée a été obtenue dans la région proche du point de référence, à l'inverse pour le paramètre B qui a influé négativement sur l'évolution de R_{C28} . Cela confirme des rapports de recherche antérieurs selon lesquels les fibres ne contribuent pas de manière significative à la résistance à la compression statique du béton et même des structures en béton avec des armatures conventionnelles [157].

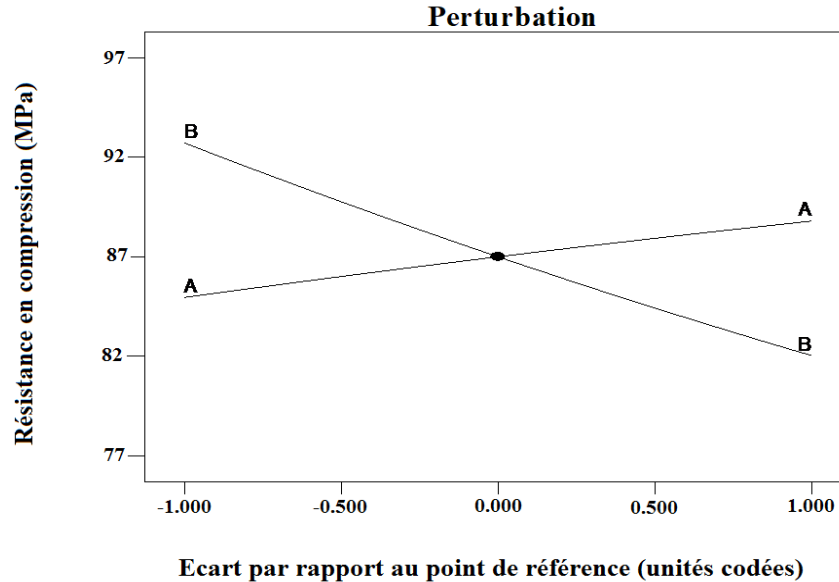


Figure IV.9. Graphique de perturbation de résistance en compression à 28 jours.

IV.4.2. La résistance à la traction par flexion (flexion 3 points)

La résistance à la flexion est ensuite, à un niveau de confiance de 95%, une valeur F du modèle de 41,09 implique que le modèle est significatif. Les valeurs de " P-valeur " inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, AB, B^2 sont des termes significatifs du modèle. Des valeurs élevées de R^2 et R^2 ajusté estimées respectivement à 0,97 et

0,94 ont démontré la compétence du modèle. Le manque d'ajustement n'est pas significatif et la valeur de F illustre une signification plus élevée pour le modèle sélectionné. On observe que la valeur F et la valeur P (< 0.0001) est les paramètres décisifs pour évaluer la signification du modèle, cela implique que le modèle spécifié correspond aux données de manière satisfaisante. Les résultats de diagnostic du modèle statistique de la Figure IV.10 ont montré que les points de données sont approximativement un ensemble linéaire, ce qui indique que le modèle a une signification très élevée.

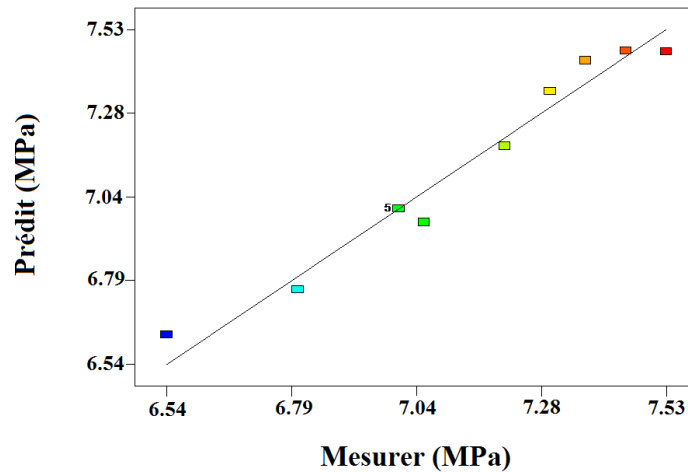


Figure IV.10. Adéquation entre les valeurs de résistance en flexion mesurées et prédites.

La Figure IV.11 montre les surfaces et les courbes iso-surfaces de la résistance en flexion à l'âge de 28 jours en fonction de pourcentage de superplastifiant SP et du dosage en fibres métalliques FM.

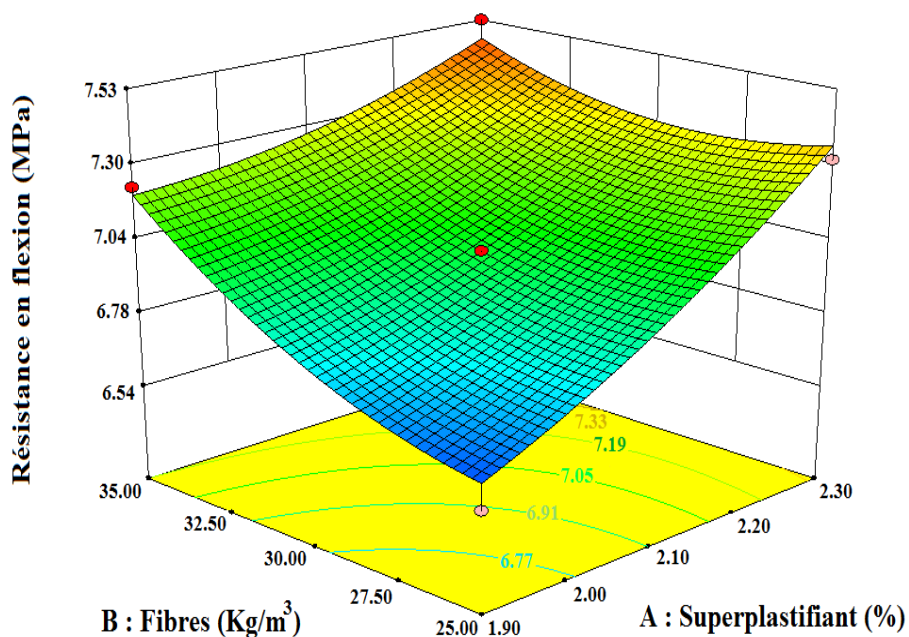


Figure IV.11. Surfaces et courbes iso-réponse de résistance en flexion (MPa) à 28 jours, en fonction de % de SP et le dosage en FM.

Les résultats illustrés sur ces figures. Montrent que pour tous les bétons nous avons une augmentation de la résistance à la flexion, ce qui est conforme à tous les résultats trouvés dans la littérature en ce qui concerne cette particularité [155,158-160]. Il y a une nette augmentation de la résistance à la flexion pour tous les mélanges.

Comme on peut le constater, la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation de superplastifiant SP et les dosages des fibres MF, une amélioration de l'ordre de 45 à 67%, cette augmentation s'explique par la présence des fibres dans la matrice. Elles jouent un triple rôle : elles permettent une mobilisation d'une plus grande partie d'énergie élastique dans le matériau, elles augmentent l'énergie consommée au voisinage de la fissure (grande ténacité), et enfin elles servent d'élément de couture sur les lèvres des fissures (après formation des fissures, les lèvres sont toujours reliées par les fibres par effet de goujon).

✓ *Mode de rupture en flexion pour différents types du béton à 28 jours*

Lors des essais mécaniques, le mode de rupture pour les éprouvettes en béton à haute performance sec (BHP) est de type fragile (rupture brutale) ceci est dû à sa faible résistance à la traction. Alors que pour tous les bétons composites à différents dosages en fibres, on a observé une rupture ductile avec une densification des microfissures. Ceci s'explique par l'ajout de fibres métalliques, dont le rôle est de stopper la propagation rapide des fissures (Figure IV.12). Les mêmes résultats ont été trouvés par Majain et al [143, 158-162].

Rupture fragile du béton BHP témoin



Densification de fissures et rupture ductile des bétons BHPF



Figure IV.12. Destruction finale des éprouvettes (7x7x28) cm³ par la flexion.

La courbe suivante de la perturbation de résistance en flexion R_{f28} (Figure IV.13) a justifié que les deux facteurs avaient l'influence la plus significative sur la résistance à la flexion de notre cas. L'influence de ses facteurs est en parallèle. Il a également démontré que la résistance à la flexion augmentera progressivement. Cela implique que les forts dosages en fibres et en superplastifiant ont une contribution positive à la résistance à la flexion.

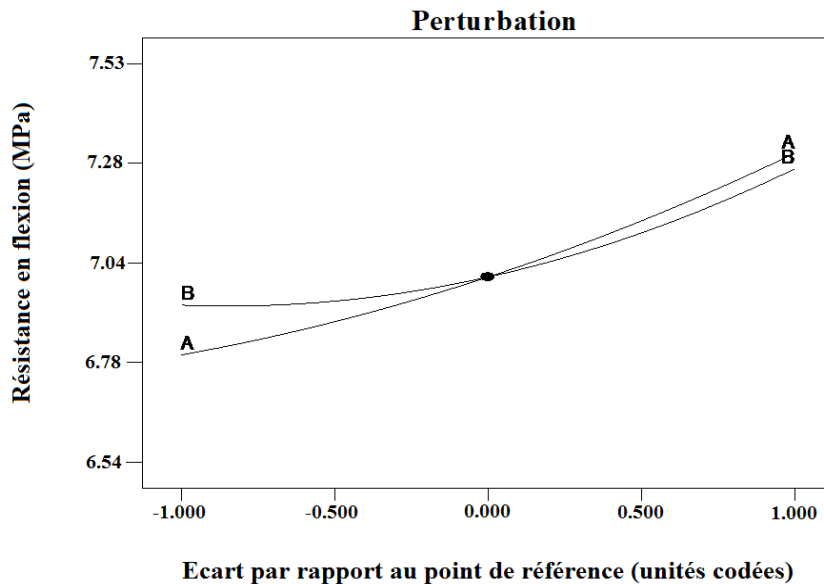


Figure IV.13. Graphique de perturbation de résistance en flexion à 28 jours.

IV.4.3. L'absorption capillaire (Sportivité)

Une absorption d'eau par le béton trop importante peut causer un certain nombre de désordres sur les structures, notamment l'écaillage du matériau après exposition au gel-dégel et la corrosion des armatures après pénétration des ions chlore.

Les résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité sont illustrés sur la Figure IV.14. Pour les différents types des bétons à hautes performances.

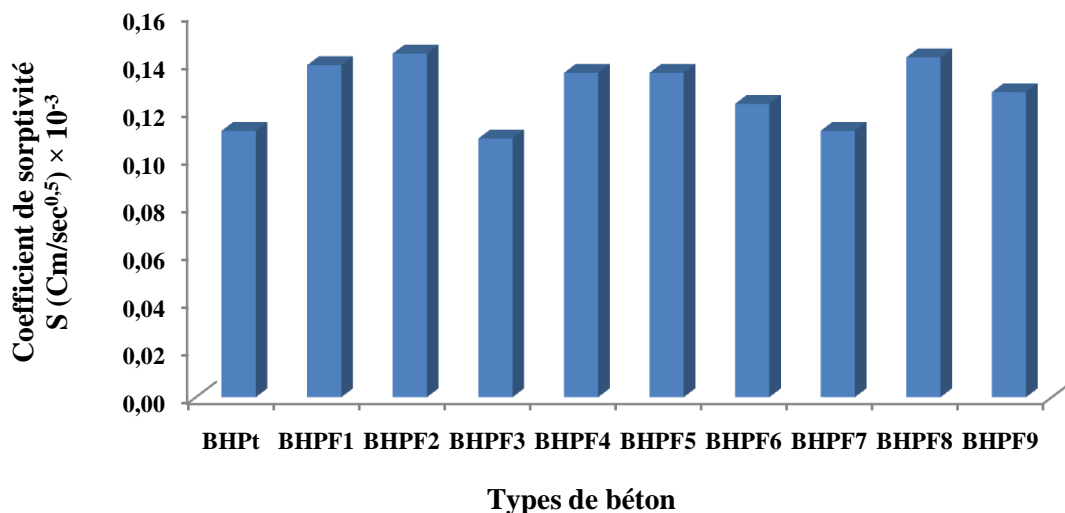


Figure IV.14. Coefficient de sportivité S des différents du BHP à 28 jours.

D'après la Figure IV.14 on remarque que l'allure d'absorption d'eau n'a pas la même cinétique pour tous les bétons. Il est nettement visible que l'absorption d'eau par capillarité augmente en fonction du temps. Ceci est observé pour tous les types du béton surtout pour les bétons qui contiennent des fibres métalliques.

Cette augmentation est progressive et proportionnelle avec le dosage de fibres métalliques incorporées dans le béton, la valeur maximale est de 0.142×10^{-3} (cm/sec^{0.5}) correspondant à un pourcentage de superplastifiant de 2.1% avec un dosage de fibres de 30 (Kg/m³) (BHPF2). Cette valeur est relativement supérieure par rapport au béton sans fibres BHP, la différence est de l'ordre de 29 %, d'autre part on observe le % de SP et le dosage de FM dans le cas de BHPF3 et BHPF7 est gardé presque même valeur d'absorption que le béton témoin BHPt, c-à-d aucun effet apparaît par le SP et FM.

En fonction du temps, l'absorption par capillarité est rapide au début. Mais par la suite elle tend progressivement à se stabiliser. Ceci a été remarqué pour toutes les compositions étudiées.

On peut conclure que les fibres métalliques amplifient la capacité d'absorption d'eau du béton, augmente avec l'augmentation de dosage. Ainsi l'introduction de fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.

IV.4.4. Essais d'auscultations dynamiques

La mesure du temps t de l'onde longitudinale du son est effectués dans le but de calculer plusieurs paramètres qui donnent une idée sur la caractérisation des matériaux (voir le chap. III §.4.5.4), les résultats de ces paramètres sont indiqués sur le Tableau IV.6, et schématisés sur les Figures IV.15 et IV.16.

Tableau IV.6. Résultats d'essai d'auscultation dynamique pour différents types de béton

Paramètres	BHPt	BHPF1	BHPF2	BHPF3	BHPF4	BHPF5	BHPF6	BHPF7	BHPF8	BHPF9
V (m/sec)	5618	5574	5561	5569	5554	5566	5581	5603	5565	5572
E_d (MPa)	68708	67711	67541	67549	68448	68657	72347	68278	70732	68895
Rc (MPa)	29.26	29.02	28.98	28.99	29.20	29.25	30.14	29.16	29.75	29.31

V (m/sec) : Vitesse de propagation ; **E_d (MPa)** : Module d'élasticité dynamique ; **Rc (MPa)** : Résistance en compression.

IV.4.4.1. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

La Figure IV.15 montrée que l'introduction des fibres métalliques dans tous les bétons à hautes performances diminué la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques par rapport au béton BHPt. Une diminution maximale de ces vitesses à l'âge de 28 jours pour un ajout de 2.3% de SP et 35 (Kg/m³) (BHP4) de fibres métalliques de l'ordre de (1,12 %). Cette diminution de la vitesse, peut expliquer du fait de l'allongement de temps de propagation du son dans la masse du béton. La présence des fibres métalliques lui font parcourir un chemin plus long. Cette constatation déjà marqué par d'autres chercheurs [163,164].

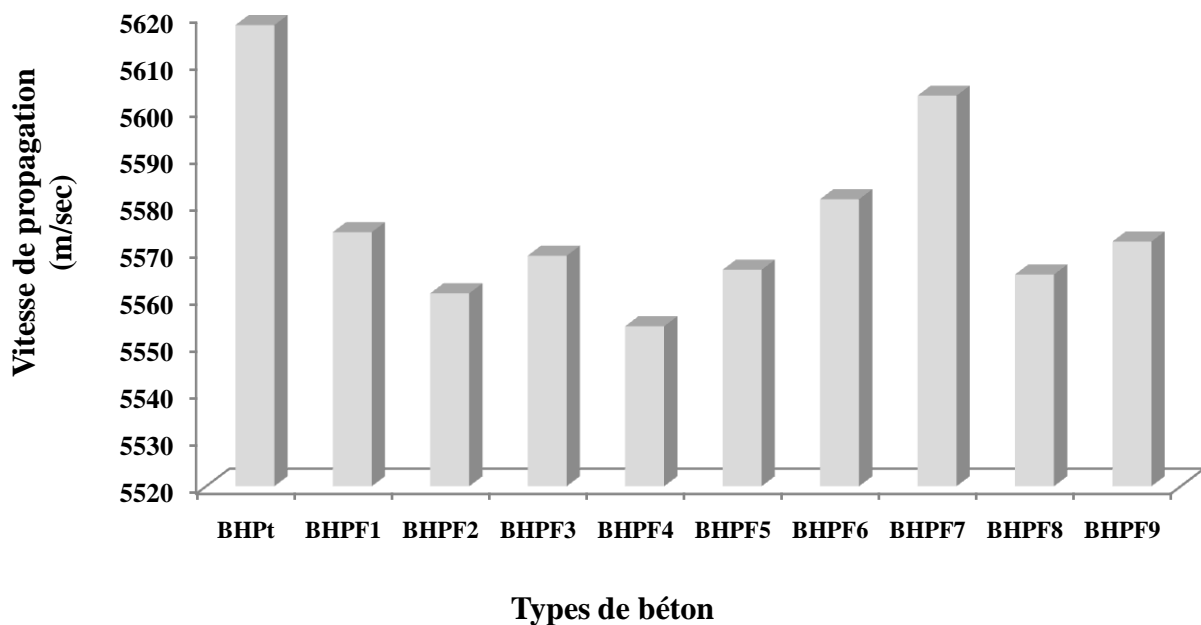


Figure IV.15. Evolution de la vitesse de propagation du son à 28 jours pour différents BHP.

Donc on peut dire que l'ajout de fibres métalliques perturbé les résultats de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, mais ces résultats reste toujours une meilleure performance. C'est à dire la qualité du béton en fonction de ces vitesses est excellente ($V \geq 4575$ m/s) (voir le chap. III. Tab III.13).

IV.4.4.2. Module d'élasticité dynamique Ed

D'après la Figure IV.16, on remarque que le module d'élasticité dynamique diminue avec la présence de fibres métalliques. Cela est dû à l'augmentation des vides dans le béton à cause l'enchevêtrement des fibres introduites d'une part, et de l'évaporation rapide de l'eau de gâchage d'autre part, qui influent aussi sur la formation des hydrates de ciments et par conséquent on obtient un matériau moins compact, par conséquent une diminution de la rigidité totale du béton.

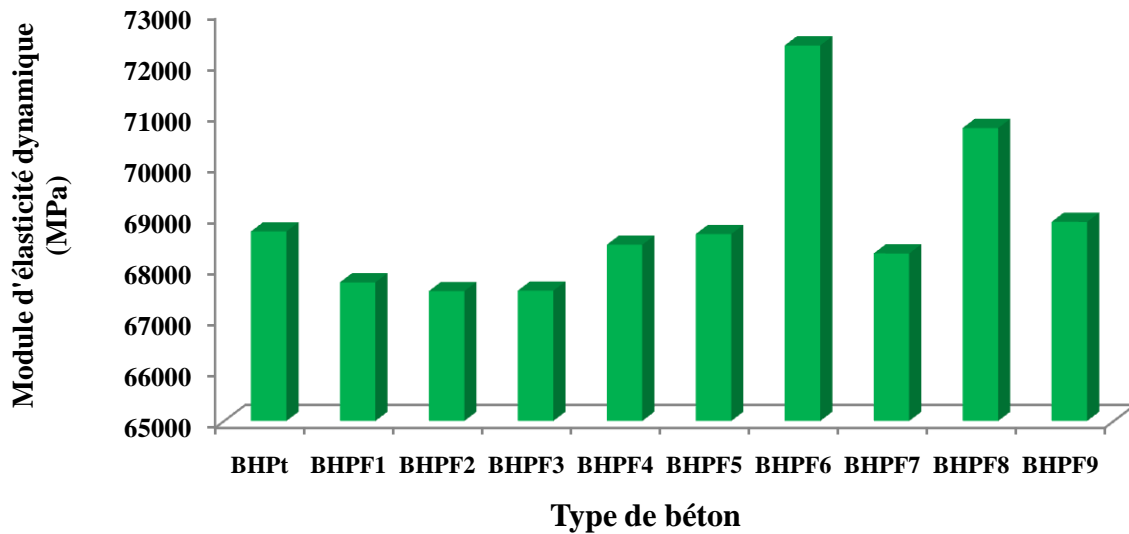


Figure IV.16. Evolution du module d'élasticité dynamique E_d à 28 jours pour différents BHP.

La même constatation pour le Tableau IV.6 concerné à la variation de résistance en compression, on remarque que la résistance diminué légèrement en fonction du dosage de fibres métalliques. Cette diminution est liée essentiellement à la porosité provoquée par l'ajout de fibres, et diminué aussi par présence de fibres métalliques lui-même, car la présence d'armature (fibres métalliques) dans le béton à un effet appréciable sur la vitesse des impulsions.

" Et enfin on peut dire que les résistances mécaniques en compression à partir de 28 jours déterminées par l'ultrason sont très inférieures à celles déterminées par la presse hydraulique pour différents types du béton (Figure. IV.17). Ce qui reflète que les essais destructifs est plus adopté au cas des bétons de fibres métalliques durcis".

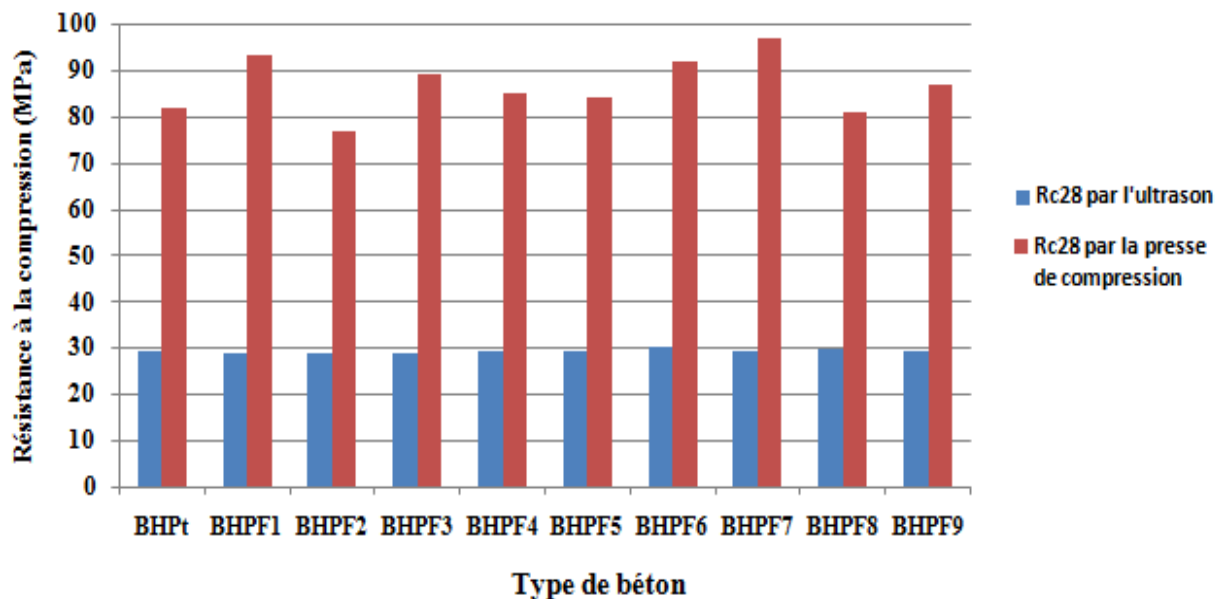


Figure. IV.17. Résistances comparatives (ultrason & par presse de compression).

IV.5 Microstructure interne de BHP

La microstructure d'un matériau cimentaire continue d'évoluer à l'état durci depuis la prise et au-delà (pendant des durées importantes pour certains matériaux à hydratation lente).

IV.5.1 Caractérisation chimique (analyse microstructurale)

L'analyse par déviation au rayon X (DRX) permet une analyse microstructurale de la pâte de béton. La DRX est une méthode utilisée pour identifier la nature et la structure des phases constitutives d'un matériau inconnu. Les matériaux sont identifiés grâce à une base de données répertoriant l'ensemble des composés cristallisés. La tendance du résultat permet de distinguer entre la phase amorphe et la phase cristalline. Le principe d'analyse consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X et tirer leurs orientations dans l'espace avec leurs intensités. Le résultat obtenu est un graphe de l'intensité enregistré en fonction de l'angle de déviation deux Thêta (2θ) du faisceau.

L'analyse DRX est réalisée sur un échantillon tiré dans une éprouvette de BHPF6 à l'âge de 28 jours. Permet d'identifier les pics des composants suivants : SiO_2 , C-S-H, Ca(OH)_2 , Ettringite (E), la calcite (C) et le gypse (CS).

- Le quartz, composant principale des graviers et du sable,
- La portlandite (P), composant résultant de l'hydratation du ciment suite à la réaction des phases C2S et C3S.
- L'ettringite (E), formé à la suite de la réaction du gypse avec le C3A,

Les résultats de l'analyse DRX d'un échantillon du BHPF6 choisir dans cette étude sont représentés dans la Figure IV.18.

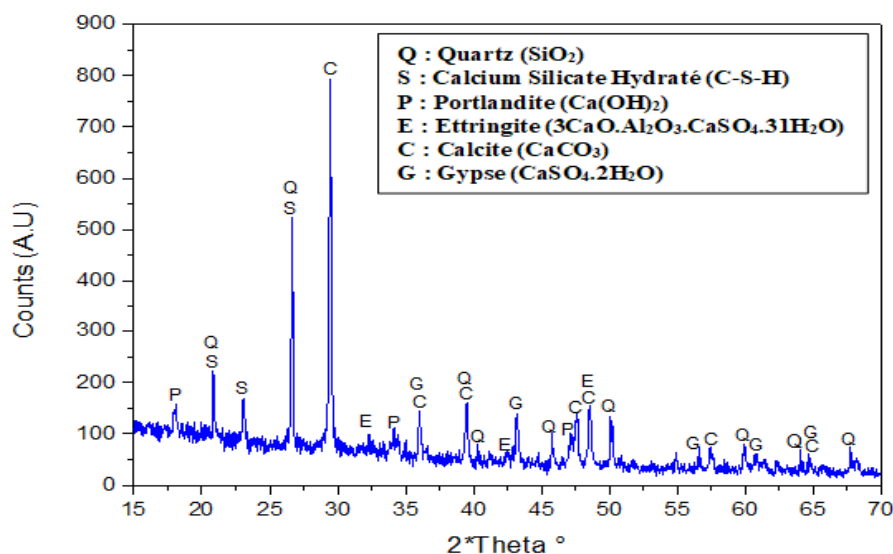


Figure IV.18. Analyses DRX du BHPF6.

On constate que les différentes analyses des échantillons présentent des pics représentant des composants cristallins, qui sont :

- Le quartz (Q), composant principal des graviers et du sable. Il est repéré avec une intensité importante à des angles 2θ de 21.5° , 26.5° , 39.5° et 50° .
- Calcium silicate hydraté (S), il est constaté après 28 jours d'hydratation, la formation de C-S-H est repéré aux angles 2θ de 21 à 26.5° .
- La portlandite (P), composant produit lors de l'hydratation des silicates de calcium anhydre (C2S et le C3S) pour former le C-S-H. Les pics correspondants à la portlandite (P) sont repérés aux angles 2θ de 17.5° , 34° , et 47° .
- Ettringite (E), dont elle est détectée à 2θ de 32.5° .
- Calcite (C), à son pic le plus intense et majeur, elle est détectée à 2θ de 29.5° à 64.5° .
- Apparition du gypse (G) est détectée à 2θ de 36° jusqu' à 64.5° .

IV.5.2 Microscope électronique à balayage (MEB)

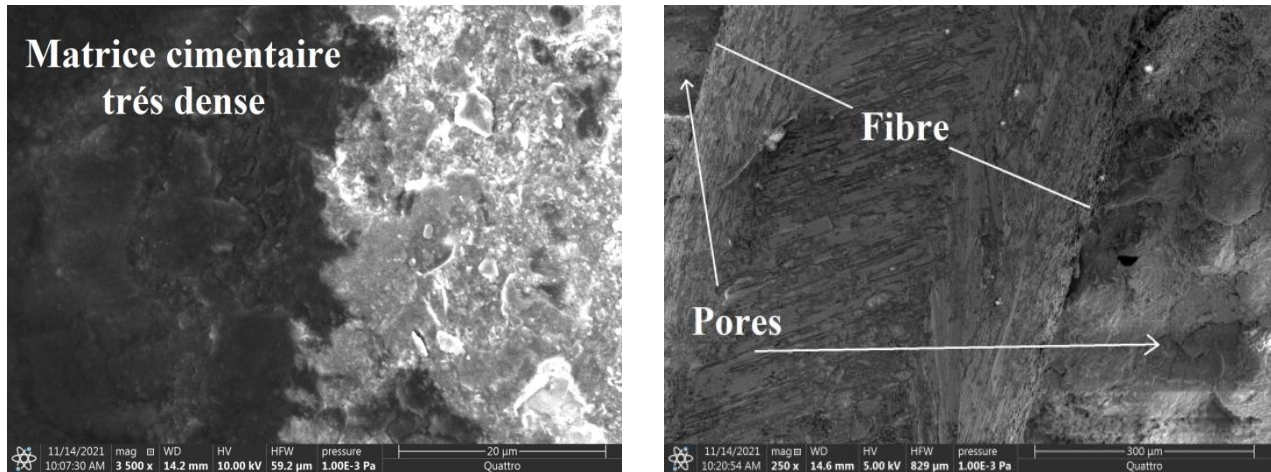
Il existe une relation bien comprise entre la microstructure des pâtes de ciments et leurs propriétés physiques et mécaniques. Dans le cadre de notre étude, une analyse microstructurale au microscope électronique à balayage (MEB) a été conduite sur les compositions BHPT et BHPT6 à l'âge de 28 jours.

Les observations par microscope électronique à Balayage (MEB) sont réalisées sur la surface d'un l'échantillon de béton avec une précision allant de $20\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$. L'échantillon observé est tiré de quelques centimètres de la surface d'une éprouvette afin de palier à l'effet de la carbonatation en surface. L'échantillon fait en moyenne 1cm de chaque côté. L'échantillon dégagé de toute particules de poussière est séché pour être polie et ensuite on dépose dessus un film transparent. Le microscope électronique à balayage environnemental (SEM) a été utilisé pour étudier la morphologie, la microstructure et la fissuration du béton. Les images ont été prises par un microscope électronique à balayage (Figure IV.19) de type (Thermo Fisher Quattro S) disponible à Plateau Techniques en Analyses Physico-chimiques (PTAPC-Laghouat).



Figure IV.19. Le microscope électronique à balayage utilisé.

Les Figures (IV.20 a et IV.20.b) illustrent les observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la microstructure de béton à haute performance de référence BHPT et le BHPT6. Les parties blanches représentent des grains de calcium, on constate aussi la présence de potassium, de magnésium. On peut voir que le BHPT présente une microstructure dense avec une bonne adhérence matrice cimentaire -granulat, ceci confirme nos résultats des propriétés mécaniques et physiques qui sont obtenues précédemment.



a/ BHPT.

b/ BHPT6.

Figure IV.20. Observation au MEB des bétons BHPT et BHPT6.

La présence de fibre est nettement visible sur la Figure IV.20. (b). On peut noter que la forme de la fibre permet une bonne adhérence avec la matrice cimentaire. La porosité est moins importante, les pores que l'on peut voir sur la même figure sont dues à l'opération de coupe de l'échantillon, elles sont situées sur l'extrême bord de fibre.

IV.6 Analyse thermique

L'analyse thermique est l'ensemble des techniques qui permet de mesurer la chaleur échangée ou la masse d'un échantillon soumis à un profil de température.

IV.6.1 Analyse ATG-ATD

Les analyses thermogravimétriques (ATG) et thermique différentielle (ATD) permettent l'étude du comportement thermodynamique des matériaux.

L'analyse thermogravimétrique ATG est une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la masse d'un échantillon lorsque celui-ci est soumis à des variations de température. Cette technique est couramment utilisée pour les matériaux cimentaires afin d'évaluer, de façon quantitative, les proportions des différentes phases (Ettringite, C-S-H, Portlandite, gypse et la

calcite, etc.) qui y sont présentes dans une matrice cimentaire. Le principe consiste à mesurer la perte de masse induite par la décomposition des hydrates lors d'une élévation de température.

L'analyse thermique différentielle (ATD) consiste à chauffer simultanément l'échantillon faisant objet de l'étude et un échantillon témoin inerte dont il est dépourvu d'effets thermique dans la température d'étude. Cela permet d'enregistrer le dégagement de chaleur accompagnant les réactions chimiques survenant lors du chauffage. L'ATD permet d'identifier les phases cristallines et la mise en évidence des phénomènes de transition de phase. Pour suivre l'évolution des phases solides caractéristiques du béton au cours de l'échauffement, l'analyse thermique différentielle (ATD) a été utilisée.

Une prise d'essai de 200 mg de BHP a été L'échantillon (de béton BHP broyé en poudre de 63 μ m), de masse égale à environ 200 mg, est placé dans un creuset cylindrique en quartz, et analysée suivant un chauffage linéaire depuis la température ambiante jusqu'à 1200°C avec une augmentation de température de 10°C/min.

Dans cette étude l'appareil utilisé pour le teste de l'ATG/ATD LABSYS Evo SETARAM TG-DTA (Figure IV.21).

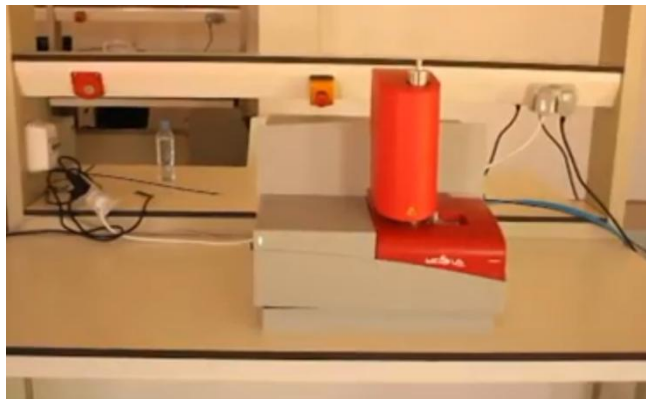


Figure IV.21. Appareil de l'analyse ATG / ATD.

Les thermogrammes (Figures IV.22 et IV.23) montrent essentiellement trois pertes de masse qui caractérisent respectivement la perte des molécules d'eau de **l'Ettringite** $C_6AS_3H_{32}$ sans différenciation, la déshydratation de la **portlandite** $Ca(OH)_2$, et la décarbonatation de **calcite** $CaCO_3$.

La Figure IV.23 montre la courbe des signaux ATD du béton à haute performance témoin BHPt. Sur cette figure, on remarque trois pics importants distincts. Ces pics sont liés à des changements structuraux produits par des transformations physico-chimiques complexes dans le béton au cours de chauffage.

Le premier pic qui coïncide avec une température de 112.0°C est associé à l'évaporation de l'eau libre ainsi qu'à la déshydratation de silicate de calcium hydraté (CSH) et de l'ettringite.

Le second pic endothermique important apparaît avec une température de 446.26°C, il est lié à la décomposition de la portlandite en chaux libre selon la réaction :



Le troisième pic coïncide avec la température de 798.72°C. Il est bien défini dans la littérature que dans l'intervalle des températures entre 700°C et 900°C les calcaires se décomposent, donc ce pic indique la décomposition des carbonates de calcium (CaCO₃) dits aussi calcite, en libérant de la chaux selon la réaction :



Les trois pics de perte de masse correspondant aux différentes températures du BHP à base de fumée de silice sont très semblables à ceux des BHP à base de filler de laitier granulé [165].

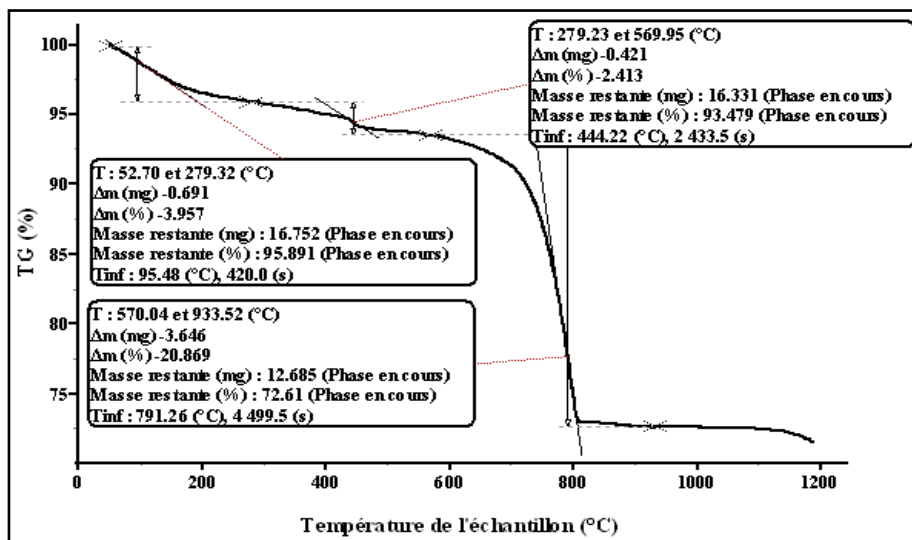


Figure IV.22. Analyse thermique thermogravimétrique (ATG) du BHPt.

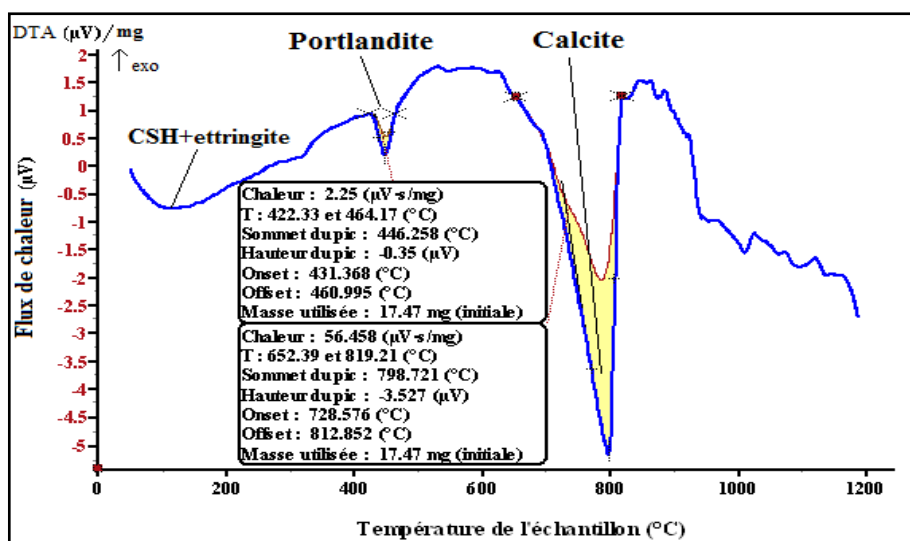


Figure IV.23. Analyse thermique différentielle (ATD) du BHPt.

La figures suivantes montrent même constatation que le premier, il ya trois pertes de masse qui caractérisent respectivement la perte des molécules d'eau de l'Ettringite $C_6A_3S_3H_{32}$ sans différenciation, la déshydratation de la portlandite $Ca(OH)_2$, et la décarbonatation de calcite $CaCO_3$.

- ✓ Le premier pic qui coïncide avec une température de 132.0°C est associé à l'évaporation de l'eau libre ainsi qu'à la déshydratation de silicate de calcium hydraté (CSH) et de l'ettringite.
- ✓ Le second pic endothermique important apparaît avec une température de 446.84°C, il est lié à la décomposition de la portlandite en chaux libre.
- ✓ Le troisième pic coïncide avec la température de 803.85°C.

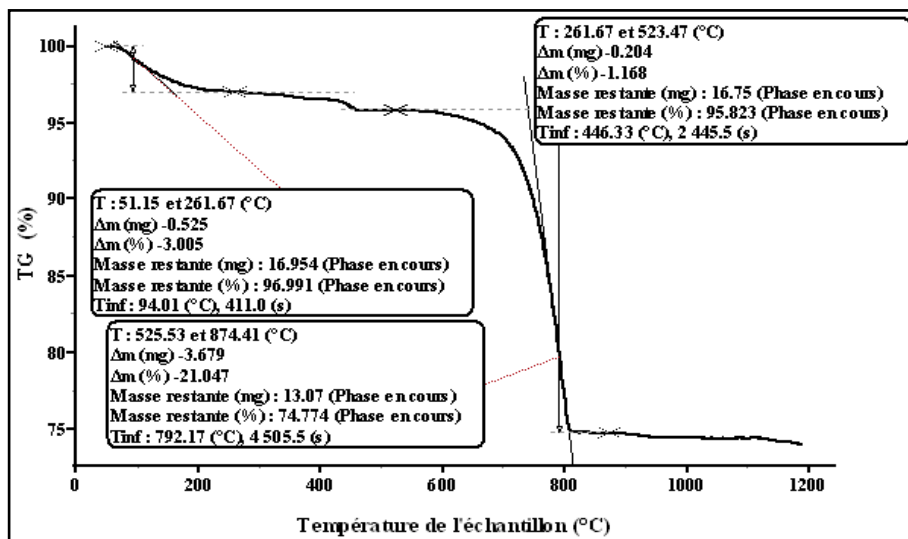


Figure IV.24. Analyse thermique thermogravimétrique (ATG) du BHPF6.

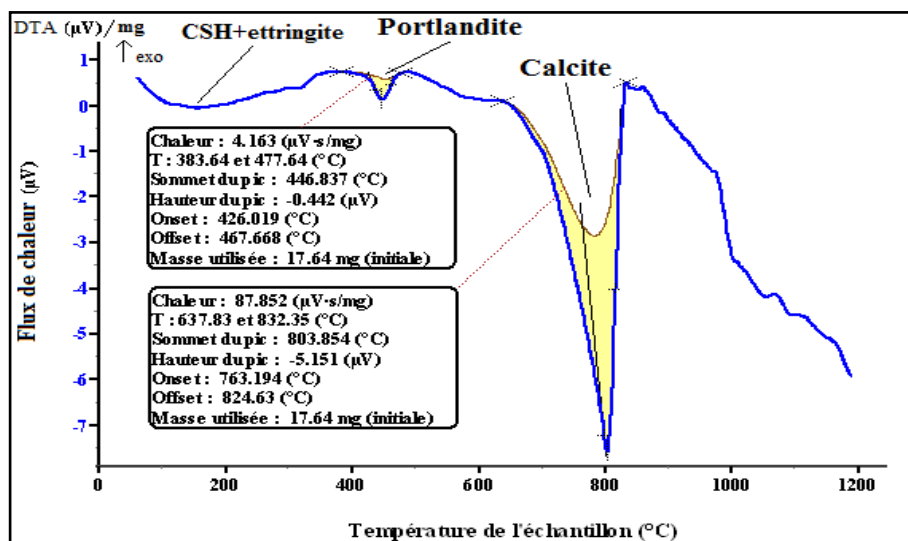


Figure IV.25. Analyse thermique différentielle (ATD) du BHPF6.

IV.7 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées sur la possibilité d'optimisation du béton à haute performance fluide BHPF, puis à l'étude de renforcement de ce béton par des fibrés métalliques.

L'analyse des erreurs statistiques utilisée pour évaluer le modèle pour surface de réponse (RSM) montre la précision des modèles obtenus ainsi que les contributions significatives apportées par les variables indépendantes, et l'efficacité prédictive du modèle pour la surface de réponse (RSM) a été classée comme très bonne pour toutes les réponses (notamment les résistances mécaniques).

L'étude de la maniabilité du BHPF renforcé de fibres, a montré que celle-ci diminue lorsque le dosage de fibres augmente. Pour un dosage de 30 (Kg/m³) de fibres, la meilleure réponse de l'étalement est obtenue lorsqu'on rajoute 2,4% du poids de ciment de superplastifiant. Et les masses volumiques à l'état frais augmentent progressivement par l'introduction des fibres.

Le superplastifiant SP est un adjuvant efficace pour diminuer le seuil de cisaillement des matériaux cimentaires.

La résistance à la compression des bétons BHPF de fibres métalliques sont nettement supérieures à celles d'un béton à haute performance témoin BHPT, sauf les (BHPF2 et BHPF8). et les résistances en flexion des bétons BHPF fibrés reste toujours supérieures à celles d'un béton sans fibres. Encore la présence des fibres métalliques est le paramètre majeur permettant d'obtenir des performances mécaniques très élevées (notamment en flexion).

L'absorption d'eau capillaire augmente légèrement en présence des fibres, et la vitesse de propagation du son dans les bétons BHPF est diminuée avec l'augmentation du dosage fibres métalliques, ainsi les résistances déterminées par l'ultrason sont très inférieures à celles déterminées par la presse à l'âge de 28 jours pour tous les bétons BHPF. Ce qui reflète que les essais destructifs est plus adopté au cas des bétons renforcés par les fibres métalliques.

L'analyse par MEB a permis de visualiser la morphologie des phases hydratées tels que les silicates de calcium hydratés CSH. Les observations MEB mettent en évidence une structure très dense avec de très nombreux grains de ciment anhydres. De plus, le MEB a montré qu'il y a une bonne adhérence entre la fibre et la matrice cimentaire. Ce qui permet d'améliorer la résistance du matériau et sa ductilité.

L'analyse thermique par ATG/ATD a montré que l'effet de superplastifiant présente une légère influence sur les courbes d'analyses thermiques (courbes semblables).

Concernant l'ATG, on remarque tous les échantillons sont perdus presque même masse des proportions pour différentes phases pendant même intervalle de température, ce qui démontre que ce dosage en superplastifiant n'apporte pas de nouveaux produits d'hydratation cristallisés (détectables par ce test d'analyse), d'autre part on observe un flux de chaleur similaire à 446 C°, et plus de différence à 800 C°.

***CONCLUSION GÉNÉRALE &
PERSPECTIVES***

Conclusion générale et perspectives

Cette étude a été menée pour répondre aux quelques questions dont certaines concernant l'évolution des propriétés rhéologiques et mécaniques du béton à hautes performances qui nécessitent d'être vibrés pour leur mise en place. D'où leur utilisation dans les éléments structuraux plus sollicités, qui sont généralement densément ferraiillés pose des problèmes de mise en œuvre. Afin de s'abstraire de la vibration dans les zones fortement ferraiillées, il a été proposé d'améliorer leur propriétés rhéologiques afin de les rendre autoplaçants et sans modification notable de leurs performances mécaniques.

La méthode de surface de réponse (RSM) est utile dans l'optimisation des mélanges de béton pour atteindre les objectifs expérimentaux et de projet souhaités. En raison de son efficacité prédictive élevée, RSM est utile pour prédire les propriétés fraîches et durcies du béton hautes performances fluides armé par des fibres métalliques BHPF, éliminant ainsi la corvée des tests répétitifs de laboratoire et facilitant la prise de décision rapide pour les applications de construction.

En partant de la formulation du nouveau béton BHPF. Nous avons cherché à modifier notre formulation de base, en faisant varier le pourcentage de superplastifiant (SP) progressivement avec l'intégration des fibres métallique (FM), puis étudier l'effet de ces paramètres sur la fluidité et les résistances mécaniques.

Les résultats ont montré que sur le plan rhéologique, les bétons formulés ont une très bonne ouvrabilité et caractérisée par un étalement satisfait. Ce qui garantit une facilité de mise en place. Les essais sur les propriétés mécaniques ont montré que de façon générale, les valeurs des résistances en compression et en flexion à 28 jours sont plus importantes (notamment en flexion) lorsque l'en ajoutés les SP et les FM, les valeurs montrent que les bétons BHPF présentent les meilleurs résultats.

Sur la base des données obtenues à partir des modèles RSM, une corrélation élevée entre la résistance à la flexion et la composition des composants du béton peuvent être développées en utilisant les capacités de généralisation. Le modèle des équations ont été développées et les résultats ont été validés par ANOVA en observant le niveau de signification du modèle de supérieur à 95 %. Un tel modèle peut être utilisé efficacement pour simuler la résistance à la flexion.

L'essai d'absorption d'eau capillaire, réalisé sur les mêmes bétons, ont consisté à suivre l'évolution d'absorption dans le temps. Les résultats obtenus montrent que le SP et les FM ont à tendance à augmentent légèrement l'absorption d'eau, sont relativement proches pour l'ensemble des bétons.

A l'échelle microstructurale des matrices choisies. L'analyse par MEB a permis de visualiser la morphologie des phases hydratées tels que les silicates de calcium hydratés C-S-H. Les observations MEB mettent en évidence une structure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Avec de très nombreux grains de ciment anhydres. De plus, le MEB a montré qu'il y a une bonne adhérence entre la fibre et la matrice cimentaire. Ce qui permet d'améliorer la résistance du matériau et sa ductilité. Cette étude confirme l'amélioration des propriétés physico-mécaniques des bétons, ce qui est de bon augure quant à son utilisation en tant que la qualité de l'ajout de fluidifiant dans les bétons à hautes performances.

Les méthodes d'analyse thermique ATG/ATD ont révélé que la composition des matériaux est qualitativement identique et qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et le SP (polymère) n'a pu conduire à la formation de nouveaux composés dans notre matrice cimentaire.

Sur la base des travaux réalisés dans la présente étude, de futurs travaux sont recommandés dans les points suivants :

- Etude le passage des bétons à hautes performances au bétons à hautes performances fluides fibrés (BHP-BHPFF) par la diminution de la fraction volumique granulaire (ϕ) et d'une diminution du rapport (G/S) ;
- Etude de la durabilité d'un béton à hautes performances fluides fibrés en milieu agressif (l'effet des attaques chimiques, étude de la corrosion...etc.) ;
- Valorisation des granulats recyclés et les fibres végétales dans la fabrication d'un béton à haute performances fluides ;
- Etude expérimentale de comportement de flexion pour les éléments fléchis fabriqué en béton à hautes performances fluides fibrés. (par exemple ; la flèche à mi travée, control l'ouverture des fissures...etc.) ;
- Utilisation les plans d'expériences pour la formulation des bétons à hautes performances fluides fibrés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] A.TALAH, Contribution a l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu chlorhydrique, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, (Algérie), 2005.
- [2] DREUX G, FESTA J, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Edition Eyrolles, 2002.
- [3] P.C. Aïtcin, Bétons haute performance, Editions Eyrolles, 2001.
- [4] A.KADIK, Comportement mécanique à haute température d'un béton haute performance avec ajout de poudre de verre (PV) recyclée, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf USTOMB, (Algérie), 2020.
- [5] R.ZAITRI, Effet de l'ajout de calcaire et de sable de dune Broyés sur le comportement physico-mécanique Et sur la durabilité des bétons à hautes Performances, Thèse de doctorat, université de laghouat, (Algérie), 2016.
- [6] A.MENOU, 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, (France), 2004.
- [7] G.Camps, Etude des interactions chimio-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton, thèse de doctorat, université de Toulouse, (France), 2008.
- [8] W.LADAoui, 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.
- [9] A.M.Neville, Propriétés des bétons, traduit par le CRIB (Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [10] A.M.Paillere, J.J.Serrano, G. Grimaldi, Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumée silice, Bulletin. Liaison.P.et ch.170.990, 1990.
- [11] L. Boubakir, Elaboration et étude d'un béton à haute performance. thèse de magister. Ecole national polytechnique d'Alger, (Algérie), 1999.
- [12] D.BENAMARA, Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP), Thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2011.
- [13] C.P. Gonilho, J. C. Gomez, L.P. Oliveira, 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.
- [14] G.Pons, J.M.Torrenti, Retrait et fluage, dans La durabilité des bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 167-216, 2009.

- [15] A.M.Neville, Properties of concrete, part 9: elasticity, shrinkage and creep, J. Wiley publishing, pp. 412-474, 1996.
- [16] S.HADRI, Le passage d'un béton à haute performance à un béton autoplaçant haute performance, Mémoire de magister, Université de Guelma, (Algerie), 2012.
- [17] T.C.Powers, The thermodynamics of volume change and creep, Materials and Structures, Research and testing (Paris), Vol 1, No, 6, Nov.-Dec, pp. 487-507, 1968.
- [18] J.Bolomey, Granulation et prévision de la résistance globale des bétons. Travaux, 19(30), 228-32, 1935.
- [19] A.Caquot, 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.
- [20] J.Faury, 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.
- [21] F.de Larrard, Concrete Mixture Proportioning - A Scientific Approach. Modern Concrete Technology Series No. 9, édité par S. Mindess et A. Bentur, E & FN Spon, Londres, mars, 421p, 1999.
- [22] F.de Larrard, 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.
- [23] S. Grzeszyk, L. Kucharska, hydrative reactivity of cement and rheological properties of fresh cement pastes, Cement and Concrete Research, 20, pp. 165-174, 1990.
- [24] L.Molez, Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydriques et mécaniques, Thèse de doctorat de l'Ecole normale supérieure de Cachan,(France), 2003.
- [25] Collection Technique CIM BÉTON, Cahier des modules de Conférence pour les écoles d'architecture nouvelles performances des bétons B90G, Édition novembre 2006.
- [26] M.BENAICHA, Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons, thèse de doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi, (Maroc), 2013.
- [27] Bury, Christensen., The role of innovative chemical admixtures in producing selfconsolidating concrete, Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 Novembre 2002, Chicago, pp 141-146.
- [28] A. BENYAHIA, Mise au point d'un mortier auto-compactant pour la réparation des structures en béton armé, thèse de doctorat, Université Hassiba BenBouali de Chlef, (Algerie), 2017.
- [29] N.TEBBAL, Effet de la nature des granulats sur les propriétés physicomécaniques et durabilité d'un béton à haute performance, thèse de doctorat, Université de M'sila. Algérie, 2017.
- [30] P.C.Aïtcin, Condensed Silica Fume, Edition de l'Université de Sherbrooke, Québec,Canada, ISBN 2-7622-0016-4, 52p, 1983.

- [31] L.Jianyong, Y.Yan, A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1203–1206, 2001.
- [32] K.Johansen, T.A.Hammer, Drying shrinkage of Norwegian self-compacting concrete, *Nordic Concrete Research*, 2003.
- [33] C.F.Ferraris, K.H.Obla, R.Hill, Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and concrete research*, vol 31, pp. 245-255, 2001.
- [34] E.P.Koehler, *Aggregates in Self-Consolidating Concrete*. Thèse de Doctorat. The University of Texas at Austin, USA, 2007.
- [35] Dreux G., Festa J., *Nouveaux guide du béton et de ces constituants*, Edition Eyrolles, 1998.
- [36] N.Hinrichs, I.Older, Investigation of the hydration of Portland blast furnace slag cement : hydration kinetics", *Advances in Cement Research*, 2(5), January 1989, pp. 9-13.
- [37] H.Shen, E.Forsberg, An overview of recovery of metals from slags, *Waste management*, N°23, pp 933-949, 2003.
- [38] C.K.Park, M.H.Noh, T.H.Park, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 842-849, 2005.
- [39] NÉCIRA Brahim, développement des bétons autoplaçants à hautes performances : Influence de la composition, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, (Algérie), 2018.
- [40] ASTM C618-03, .Standard specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, 2003.
- [41] N.KAID, Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques, Thèse de magistère génie civil à l'USTMB d'Oran. (Algérie), 2000.
- [42] G. DREUX, J.FESTA, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Septième édition, Edition Eyrolles, 1995.
- [43] Sous la direction de F.De Larrard, *Construire en béton*, Collection du LCPC, 2002.
- [44] W.BERND, G.CHRISTIAN, Comportement à l'arrachement de fibres d'un béton renforcé de fibres d'acier, *Otto-Graf-Journal* Vol. 7, pp. 116-127, 1996.
- [45] A. EL HILALI Abdellah, Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (bap): influence des fines calcaires et des fibres végétales, thèse de doctorat, Université Cergy Pontoise, (France), 2009.
- [46] M.MASMOUDI, Amélioration des caractéristiques mécaniques du béton et du mortier par renforcement en fibres d'acier, Mémoire de magister, université de Biskra, (Algérie), 2008.
- [47] M.BENTALHA, Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, Caractérisation - comportement monotone -microstructure, Thèse de doctorat, université de Constantine, (Algérie), 2007.
- [48] R. BELAID, Etude de bétons a hautes performances a base de poudre de marbre et de cendres, Mémoire de magistère, Université de Houari Boumediene, (Algérie), 2013.

- [49] F.De larrard, Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Thèse de doctorat de l'ENPC, Rapport de recherche des LPC N°149, (France), 1988.
- [50] J.XIE, Mechanical proprieties of three high strength concrete containing silica fume. ACI Material Journal, N° March –April 1995.
- [51] G.Schutter, Le béton à hautes performances, Bulletin FEBELCEM, Fédération de l'industrie cimenterie, P15, Belge 2007.
- [52] Y.CHERAIT, Z.NAFA, Eléments de matériaux de construction et essais, Collection : le livre de génie civil, Direction de la publication universitaire de Guelma, 2007.
- [53] R.Le Roy, F.de Larrard, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium in Barcelona, 500-508, E&FN Spon, London, 1993. 5. V.
- [54] B.PERSSON, Experimental studies on shrinkage of high performance concrete, Cem. and Conc. Res., Vol 28, No.7, pp.1023-1036, 1998.
- [55] V.SICARD, Creep and shrinkage of High-Strength Concrete, The Fifth International RILEM Symposium in Barcelona. E&FN Spon. London, pp. 500-508, 1993.
- [56] R.Chaid,Formulation, Caractérisation et Durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux, Thèse doctorat ENP, (Algérie), 2006.
- [57] Baroghel-Bouny, Les spécificités des bétons à hautes performances : Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles, Etudes et recherches des LPC, Série Ouvrages d'art, OA 44 (LCPC, Paris, sept. 2004), 76 p.
- [58] M.REGOURD, Durabilité des bétons à hautes performances : réaction alcalis-granulats et carbonatation, les bétons à hautes performances : caractérisation, durabilité, application, 2e édition par Malier y, presse de l'ENPC, Paris, p. 255-269, 1992.
- [59] MAIZA, Contribution à l'étude des propriétés physicomécaniques des bétons à hautes performances, Mémoire de Magister, Université m'hamed bougara-boumerdes, (Algérie), 2012.
- [60] F.Agostini, Z.Lafhaj, F.Skoczylas, and H.Loosveldt, Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar », Cement and Concrete Research, vol. 37, p. 71-78, 2007.
- [61] S.CHATTERJI, N.TAULOW and P.CHRISSTENSEN, « Pouzzolanic activity of product silica fume from ferrosilicon production », Cement and concrete research, vol. 12, September 1982, p. 781-784.
- [62] I.H.Gaweska, Comportement à haute température des bétons à hautes performance- évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole doctorale MODES, 2004.
- [63] https://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Point_Tower, Consulté le 06/07/2022.
- [64] <https://www.emporis.com/buildings/117352/plaza-440-chicago-il-usa>, Consulté le 06/07/2022.

- [65] J.M. Brocherieux, Les bétons à hautes performances : les cas des tunnels, les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.583-599, 1992.
- [66] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_de_1%27%C3%AEle_Rousski, Consulté le 06/07/2022.
- [67] G . Cadoret , P . Richard : « Utilisation industrielle des bétons à hautes performances dans le bâtiment et les travaux publics », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.553-574, 1992.
- [68] PAN Jing, Influence des adjuvants chimiques sur la performance des mortiers de béton équivalent à rhéologie adaptée, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2011.
- [69] LAIFA Walid, Contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons autoplacants, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, (Algérie), 2015.
- [70] LOUKILI. A and TURCRY. PH, Effect of a viscosity agent on mechanical properties of selfcompacting concrete. In Proceedings of the Conference ICPCM A new era of buiding, 2003.
- [71] ROLS S., AMBROISE J and PÉRA J, Effects of different viscosity agents on the properties of Self-leveling concrete. Cement and Concrete Research, 29:261_266,1998.
- [72] GRAIRIA Saïd, déformations différées, ténacité et adhérence des bêtons autoplacants a hautes performances, Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 de Guelma, (Agérie), 2018.
- [73] Okamura, H., and Ozawa, K., Mix design for self-compacting concrete, Concrete Library of JSCE, No.25, 1995, pp.107-120.
- [74] Okamura, H., and Ouchi, M., Self-compacting concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, 2003, pp.5-15.
- [75] Persson, B., A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and Concrete Research, Vol.31, No.2, 2001,pp.193-198.
- [76] Zhu, W., and Bartos, P.J.M., Permeation properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, Vol.33, No.6, 2003, pp.921-926.
- [77] Imène Joudi-Bahri, Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien, Thèse de doctorat, en cotutelle (l'Université de Lorraine, France et l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis), 2012.
- [78] OZAWA K., KUNISHIMA M.; MAEKAWA K., OKAMURA H, Challenge for high performance concrete, Proc. Conf. On high performance, University of Tokyo,1991, p. 5-17.
- [79] AFGC, Bétons Autoplacants, Recommandations Provisoires, Documents Scientifiques et Technique, Page 63, 2000.
- [80] YURUGI, M, SAKATA, N, IWAI, M, SAKAI, G, Mix Proportion for Highly Workable Concrete, Conference Concrete 2000, Dundee, Scotland,1993, pp. 579–589.

- [81] Sonebi M., Evaluation of the ségrégation resistance of fresh self-compacting concrete using different test methods, Proceedings of the International Symposium on Design, Performance and Use of the Self-Consolidating Concrete. Changsha, Hunan, China, 2005.
- [82] Khayat , K. H, Propriétés du béton frais. Dans Technologie avancée du béton. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2009.
- [83] Baudouin M. AISSOUN, Etude de l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des Bétons fluides à rhéologie adaptée, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2011.
- [84] T. Sedran, Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, These de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [85] T. Noguchi, S.G Oh, F. Tomosawa, Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete, Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, suède, pp. 59-70, 1999.
- [86] ROUIS Fahima, Effet des caractéristiques Physico-chimiques des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques des mortiers de bétons fluides équivalents, Thèse de doctorat en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2017.
- [87] BENYAMINA S, Performance des bétons autopaçants à base de sable de concassage. Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb de Blida 1. (Algerie), 2020.
- [88] ADJOU DJ M'hamed, Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton, Thèse de doctorat, en cotutelle (l'Université cergy-pontoise, France et l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie), 2015.
- [89] Koehler E.P., Fowler D.W. Aggregates in self-consolidating concrete. Research Report ICAR 108-2F. International Center for Aggregates Research, March 2007.
- [90] Chiara F. Ferraris., Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 104, Number 5, September–October 1999.
- [91] BOUZIANI Tayeb, Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant, Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, (Algérie), 2012.
- [92] Tattersall G.H. and Banfill P.F.G., The rheology of fresh concrete, Pitman Ed. London, 1983, pp. 356.
- [93] Ferraris C. F., and De Larrard F., Testing and modelling of fresh concrete rheology, NIST, fevrier 1998, NISTIR 6094, pp. 61
- [94] De Larrard F., Structures granulaires et formulation des bétons, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, 1999. CD-Rom, Format PDF.
- [95] Nielsson I. and Wallewick O. H., Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, 2003, pp. 59-68.
- [96] Grünewald S., Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, Thèse de doctorat de Delft University of Technology, Pays Bas, 2004, pp. 192.

- [97] De Larrard F., Ferraris C.F. and Sedran S., Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material, *Materials and Structures*, 31 (1998): 494-498.
- [98] Banfill P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete - a review, *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Cement's Contribution to the Development in the 21st Century*, Durban, Afrique du Sud, Mai 2003, pp. 50-63.
- [99] E. CHUTA, J. JEONG., Influence des paramètres de formulation des pâtes ciments sur les aspects de parements, 23^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2017, Lille, France.
- [100] Evan Mitsoulins., *Flows of viscoplastic materials: Models and computations*, *Rheology reviews 2007*. British Society of Rheology.
- [101] Domone P., Xu Y. and Banfill P., Developments of the Two-Point Workability Test for High-Performance Concrete, *Magazine of Concrete Research* vol. 51, 1999, pp. 181-190.
- [102] Tattersall, G.H, *Workability and quality control of concrete*, Chapman and Hall, 1991, 262 p.
- [103] Westerholm M, *Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate*, Luleå University of Technology, 2006.
- [104] Asakura E., Yoshida H., Nakae H., Influence of superplasticizer on fluidity of fresh cement paste with different clinker phase composition, *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements*, New Delhi IV; 1992, pp.570-576.
- [105] Vom Berg, W, Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 109, p. 211-216, 1979.
- [106] Didouche Zahia, Ezziane Karim., Effect of cement fineness and polycarboxylate dosage on the rheological and mechanical behavior of a mortar, *MATEC Web of Conferences* 149, 01037, 2018.
- [107] Zhang X., Han J., The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cement and concrete research* Vol. 30, p. 827-830, 2000.
- [108] Wallevik, O. H, *Description of Fresh Concrete Properties by use of Two-Point Workability Test Instrument*. M.Sc., The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1983.
- [109] Bjömström j et Chandra S., Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements, *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, vol. 36, 2003, pp.685-692.
- [110] Husson S., *Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers, Application aux mortiers*, thèse de Doctorat, ENSM Saint-Etienne et INP Grenoble, mars 1991, 166p.
- [111] Hu C., *Rhéologie des bétons fluides*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, *Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Paris, France OA16, 1995, 203 p.
- [112] BENTEGRI Imane, *Etude du comportement rheologique du beton renforce par des fibres organiques*, *Academic Journal of Engineering*, 2021, vol. 39 (1)
- [113] Petit, J.Y., Khayat, K.H., Wirquin, E., Methodology to Couple Time-Temperature Effects on Rheology of Mortar, *ACI Materials Jr.*, 2008, Vol. 105, No. 4, p. 342-349.

- [114] LI Z., Ohkubo T. A., Tanigawa Y, Yield Model of High Fluidity Concrete in Fresh State, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, N° 3, 195 – 201, 2004.
- [115] Griesser A, Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures: rheology, phase composition, pore water and heat of hydration of cementitious systems, Thèse de doctorat de l'Institut de Technologie Fédéral, Suisse, 2002.
- [116] Golaszewski JG., Szwabowski J., Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, *Cement and concrete research*, vol. 34,2004, pp. 235-248.
- [117] Helnan-Moussa Benjamin, Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplaçants. These de Doctorat, Université d'Artois, (France), 2009.
- [118] Yang, M., and H. M. Jennings, Influence of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste, *Advanced Cement Based Materials*, 1995, p.70–78.
- [119] Lemay, C, Étude de l'influence de l'automatisation du malaxage en bétonnière sur la variabilité du béton, Mémoire de maîtrise, département de génie mécanique de l'Université Laval, 2000.
- [120] Haddadou Naima, Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre, Thèse de doctorat de l'Université M'hamed Bougara, Boumerdes, (Algérie), 2015.
- [121] Okamura.H, Ozawa.K and Ouchi.M, self-compacting concrete, *Structural Concrete*, Marsh – 2000.
- [122] NA 442. Algerian Standards, hydraulic binders – common Cements, Composition, Specification, IANOR, Algiers; 2003 [in French].
- [123] ASTM C1240, Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.
- [124] DOUARA Taha Hocine, Effets des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable, Thèse de doctorat, université de biskra, (Algérie), 2019.
- [125] AFNOR, 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, (2003)
- [126] Aitcin CP. High performances concrete. Paris: Edition Eyrolles; 2001.
- [126] Deniz Bas, Ismail H Boyaci, Modelling and optimization. I. Usability of response surface methodology, *Journal of Food Engineering.*, 78 (2007), 836–845.
- [127] Montgomery, D.C.: Design and Analysis of Experiments, 5th edn. Wiley, New York (2001).
- [129] O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, M. Gholhaki, Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: optimization using response surface method, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 59–68.
- [130] V.C. Khed et al., Experimental investigation on pull-out strength of hybrid reinforcement of fibre in rubberized cementitious composites, *Int. J. Civil Eng. Technol. (IJCIET)* 9 (7) (2018) 1612–1622.

- [131] Megan Weyers, Elsabe P. Kearsley. Effect of High Plasticiser Dosage on Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, 2020.
- [132] Norme Française., (1981), Béton-Essai d'étude, de convenance et de contrôle-confection des éprouvettes, Éditions AFNOR, Paris 1981.
- [133] ASTM C143. Standard test method for slump of hydraulic.cement concrete; 2012.
- [134] Norme Européenne NF EN 12350-6., (1999), Essai pour béton frais –Partie 6: Masse volumique, Éditions AFNOR, Paris 1999.
- [135] BS EN 12390-3. Testing harden concrete. Compressive strength of test specimens. France ; 2012 April.
- [136] BS EN 12390-5, Béton-Essai de flexion, Éditions AFNOR, Paris 1981.
- [137] Norme Française, P 18 418. (1989), béton-Auscultation sonique, Éditions AFNOR, Paris 1989.
- [138] Sonebi M., "Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts", Cement and Concrete Research, 31(2001): 1553-1560.
- [139] Grunewald S., Performance-based design of Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete, Ph D thesis, 2004, 165 p.
- [140] E. Güneyisi, Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash. Mater. Struct. 2010, 43 (8), 1037e1048.
- [141] T.M. Grabois, G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, R.D., Fresh and hardened state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. Construction and Building Materials,. 2016, 104, 284e292.
- [142] H. Basser, T. M. Shaghghi, H. Afshin, R. S. Ahari, S. S. Mirrezaei, An experimental investigation and response surface methodology-based modeling for predicting and optimizing the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete containing steel fiber and PET, Construction and Building Materials,. 315 (2022) 125370.
- [143] R. Deeb, A. Ghanbari, B.L. Karihaloo, Development of self-compacting high and ultra-high performance concretes with and without steel fibres, Cement & Concrete Composites 34 (2012) 185–190.
- [144] P. Jeganmurugan, A.S. Rameswari, N. Anuja, Experimental behaviour of fibre reinforced Self compacting concrete under cyclic loading, Materials Today: Proceedings 52 (2022) 1488–1493.
- [145] K. . Akça , M. Ipek, Effect of different fiber combinations and optimisation of an ultra-high performance concrete (UHPC) mix applicable in structural elements, Construction and Building Materials,. 315 (2022) 125777.
- [146] F. Aslani, J. Kelin, Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures, Journal of Cleaner Production 200 (2018) 1009e1025.
- [147] Association Française de Génie Civil, Bétons autoplaçants " Recommandations provisoires " Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.

- [148] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj.; Bourdot, A.; Babachikh, O.; Hamadouche, A. The effect of ceramic wastes on physical and mechanical properties of eco-friendly fowable sand concrete *Ceramic Materials*. IntechOpen. 10, 2 (2020).
- [149] Bonneau. O, *Étude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à ultra-hautes performances*", Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, France et Université de Sherbrooke, Canada, 1997.
- [150] TALER Omar, «Etude de comportement Rhéologique des bétons autoplaçants locaux », mémoire de fin d'étude, université Aboubakar Belkaid-Tlemcen-faculté Technologie ,2017.
- [151] Hassan, A.A.A., Lachemi, M. et Hossain, K.M.A., "Effect of Metakaolin on the Rheology of Self-Consolidating Concrete", *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, RILEM Bookseries, V. 1, (2010), 103–112.
- [152] BELFERAAG Allaoua, Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes, Mémoire de magister, université d'Ouargla, (Algérie), 2006.
- [153] Cheng Yuan, WensuChen, Thong M.Pham, HongHao, Bond behavior between basalt fibres reinforced polymer sheets and steel fibres reinforced concrete, *Engineering Structures*, Volume 176, 1 December 2018, Pages 812-824.
- [154] Osama Zaid, Faisal M. Mukhtar, Rebeca M-García, Mohammad Galal El Sherbiny and Abdeliazim M. Mohamed, Characteristics of High-Performance Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Utilizing Mineral Filler, *Case Studies in Construction Materials*,2021, 16, e00939.
- [155] E. Rahmani, M. Dehestani, M.H.A. Beygi, H. Allahyari, I.M. Nikbin, On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles, *Construction and Building Materials*,.47 (2013) 1302–1308.
- [156] Nelly Majain, Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Azlan Adnan, Roslli Noor Mohamed, Bond behaviour of deformed steel bars in steel fibre high-strength self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*,. 318 (2022) 125906.
- [157] N.V. Chanh, *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Faculty of Civil Eng HO Chi Min City University of Technology, 2004, pp. 108–116.
- [158] Ingrid Lande Larsen, Rein Terje Thorstensen, The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials* 256 (2020) 119459.
- [159] Ibrahim I.S, Che Bakar,M.B, Effects on mechanical properties of industrialised steel fibres addition to normal weight concrete, *science direct, procedia engineering* 14 (2011) 2616-2626.
- [160] WasimAbbassM. Iqbal Khan. ShehabMourad. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Constr. Build. Mater* 168 (2018) 556-569.
- [161] K. A. Ostrowski, K. Furtak, The influence of concrete surface preparation on the effectiveness of reinforcement using carbon fibre-reinforced polymer in high-performance, self-compacting, fibre-reinforced concrete, *Composite Structures* 276 (2021) 114522.

- [162] D. Zhang, H. Tu, Y. Li, Y. Weng, Effect of fiber content and fiber length on the dynamic compressive properties of strain-hardening ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*,. 328 (2022) 127024.
- [163] BEN YAHIA Abdeslam, l'Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique du béton, Mémoire de magister, université de M'sila, (Algérie), 2001.
- [164] RICHANE Saci, Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton, Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf M'sila, (Algérie), 2004.
- [165] SAADI IMENE, Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons à hautes performances « Effet des additions minérales et fibres de polypropylène », Thèse de doctorat, université Annaba, 2017.

ANNEXES

Annexe A - Fiche technique du ciment



SPA BISKRIA CIMENT



PRODUCT DATA SHEET

CEM I 42.5R

PORTLAND CEMENT

CEM I 42.5R Portland cement, for high performance concretes with rapid short-term resistance, intended for areas where removal of formwork deadlines are short, it is particularly recommended for concreting in cold weather.

CEM I 42.5R :

Compliant with Algerian Standard (NA442-2013)

👉 APPLICATION AREAS

A cement for all your high strength construction works at a young age, it is also recommended for the following uses :

- Concrete products which require rapid hardening.
- Concreting in sliding formwork, especially in wintertime.
- Concrete resistant to frost in the presence of de-icing salts.
- Bridge decks.
- Pumped concrete.
- Sprayed concrete.



✓ RECOMMENDED APPLICATIONS

- Reinforced concrete with high resistance.
- Self-consolidating concrete.

🪣 RECOMMENDED FORMULATION

	cement 	Sand (dry) 0/5 	Gravel _(dry) 0/15mm 15/25mm 	Water (liters) 
Concrete dosage	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L
	cement 	Sand Corrector 0/1mm 	Sand (dry) 0/4mm 	Water (liters) 
Mortar for bricklaying	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 35 L
Finishing mortar	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 35 L

Note : one Drum = 10 liters

🔍 TECHNICAL CHARACTERISTICS

Chemical analyzes (%)	value
Loss on ignition	2.6 – 3.7
Sulphate content (SO ₃)	2.2 – 2.8
Magnesium Oxide content (MgO)	1.7 – 2.8
Chloride content (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Potential composition of Clinker (%) (According to Bogue)	value
C ₃ S	56 – 66
C ₂ A	5.1 – 7.2
Physical properties	value
Normal consistency (%)	25.8 – 26.4
Hot expansion (mm)	0.25 – 1.0
Setting time (min)	value
Setting start	150 – 190
Setting end	220 – 250
Résistance à la compression	value
2 days (MPa)	20 – 29
28 days (MPa)	42.5 – 52.5



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT
Adress : Djar Belahrache
Branis , Biskra Algeria

Phone : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 558 108
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

Annexe B - Fiche technique de la fumée de silice

BUILDING TRUST



NOTICE PRODUIT

Condensil S-95 DP

FUMÉE DE SILICE DENSIFIÉE POUR BÉTONS HAUTES PERFORMANCES ET HAUTE DURABILITÉ

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

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

DOMAINES D'APPLICATION

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

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

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

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

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

AGRÈMENTS / NORMES

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

Caractéristiques	Exigences normatives	Valeurs observées
Densité apparente	~ 0.65 (0.55 à 0.75)	0.64 ± 0.03
Densité réelle	2.24	
Surface spécifique BET (m ² /g)	Entre 15 et 35	22.5 ± 2
Teneur en SiO ₂	≥85 %	95 % ± 2
Teneur en Si élémentaire	≤0.4 %	0.14 % ± 0.05
Teneur en Na ₂ O eq.	≤ 1.0 %	0.50 % ± 0.1
Teneur en SO ₃	≤2.0 %	0.27 % ± 0.50
Teneur en Cl-	≤0.1 %	0.01 % ± 0.01
Indice d'activité à 28j	≥100 %	≥101 %
Perte au feu	≤4.0 %	2 % ± 0.5
Teneur CaO	≤1.0 %	<0.1 %

DESCRIPTION DU PRODUIT

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

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Le dosage habituel est de 5 à 10 % du poids du ciment (pour tout autre dosage nous consulter).
--------	--

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP doit être introduite avec le ciment.
Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice CONDENSIL S95 DP, il est indispensable de défloculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, la fumée de silice CONDENSIL S95 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant /haut réducteur d'eau de type SIKA VISCOCRETE.

VALEURS DE BASE

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

RESTRICTIONS LOCALES

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

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

La fumée de silice CONDENSIL S95 DP étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors de son utilisation.

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

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits

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

Annexe C - Fiche technique de l'adjuvant

NOTICE TECHNIQUE

Version 03

Edition février 2017

2

1

3

5

MEDAFLOW RE 25

Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075

**Super plastifiant–Haut réducteur d'eau
Pour travaux de préfabrications****Description**

Le MEDAFLOW RE 25 est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas.

Le MEDAFLOW RE 25 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Réduction du temps de décoffrage
- Accélération de la rotation des moules
- Bétons précontraints et architecturaux

Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW RE 25 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

Mode D'emploi :

Il est recommandé d'ajouter le MEDAFLOW RE 25 dans le béton après introduction des ¾ de l'eau de gâchage. Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage adéquat pour les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1min/m3.

Par temps chaud, le MEDAFLOW SR25 peut être combiné à un retardateur de prise (MEDARETARD GR).

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

1.0 à 2.5% du poids de ciment soit 0,93 litres à 2,36 litres.

Pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Conditionnement Et Stockage :

Le MEDAFLOW RE 25 est conditionné en bidons de 11 kg , fûts de 240 kg et cubétenaire 1100 kg.

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C)

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

Précautions D'emploi :

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

NB : Les produits à base de Poly carboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en 06 FEV 2012

DESIGNATION	Rc (MPA)	
Jours	1J	28J
Témoin	5,4	28,0
MEDAFLOW RE25 (%)	13,2	39,5

Ciments CPJ = 42.5 = 350Kg/m³
E/C = 0.38

Caractéristiques :

- Aspect..... liquide
- Couleur..... Brun clair
- pH..... 7
- Densité..... 1,06 ± 0,01
- Teneur en chlore..... < 0,1 g/l
- Extrait sec..... 25%

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tel : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Annexe D - Fiche technique de fibres utilisées

Construction

Notice technique provisoire
Edition septembre 2005
Numéro 2.35
Version n°111 2005
SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE®

SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE®

Fibres métalliques pour la SIKA® VISCOCHAPE®.

Présentation Les fibres SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® sont fabriquées à partir de fils d'acier tréfilés. Elles sont en forme de balonnette encolées en plaquettes pour assurer une bonne répartition dans la chape.

Domaines d'application Les fibres SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® sont utilisées exclusivement dans la chape autonivelante SIKA® VISCOCHAPE®. Elles sont destinées à remplacer le treillis anti-fissuration et les armatures périphériques éventuelles (cas des planchers rayonnants électriques) dans les cas suivants :

- chape désolidarisées sur polyane pour les locaux P4,
- chape sur isolant de classe SC2,
- planchers chauffants à eau basse température,
- planchers réversibles,
- planchers rayonnants électriques.

Les fibres SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® peuvent être utilisées avec des tuyaux chauffants en plastique.

Caractères généraux Grâce à la nature de l'acier qui les constitue et au système d'ancrage mécanique dont elles sont dotées aux extrémités, les SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® présentent des caractéristiques de grande résistance à l'arrachement et à la traction.

Incorporées dans la SIKA VISCOCHAPE, les SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® lui confèrent les propriétés suivantes :

- ductilité grâce à la capacité des fibres à se déformer pour des efforts élevés sans diminution significative de la résistance,
- ténacité liée à la redistribution des contraintes et l'amélioration de l'absorption d'énergie nécessaire à la rupture,
- accroissement de la résistance à la fatigue et aux chocs,
- contrôle de la fissuration grâce à la reprise des contraintes qui permet de maîtriser l'ouverture des fissures en s'opposant à leur propagation.

Caractéristiques

Nature	Fils d'acier carbone (EN 10016-2 – C9D) tréfilés sans revêtement.
Géométrie	<ul style="list-style-type: none"> ■ Elancement (l/d) : 55 ■ Diamètre : 0,55 mm ■ Longueur : 30 mm
Nombre de fibres	16750 fibres/kg
Longueur de fibres pour 10 kg/m³	5025 m
Résistance à la traction	> 1100 MPa
Conditionnement	Sacs papier de 10 kg, palette de 60 sacs (600 kg)
Stockage	Ne pas gerber les palettes

Sika®

1

SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® 1/2

Construction

Conservation	Protéger les palettes de la pluie
Conditions d'application	
Dosage	Dans la SIKA® VISCOCHAPE®, les SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® se substituent aux treillis anti-fissuration et armatures périphériques éventuelles pour un dosage de 10 kg/m ³ de chape.
Mise en oeuvre	
Préparation du mélange	Il est recommandé d'ajouter les SIKA® METAL FIBRES VISCOCHAPE® directement dans le malaxeur de la centrale à béton simultanément au sable. Ne pas introduire les fibres en premier et ne pas jeter les sacs en papier dans le malaxeur. Malaxer le mélange (sable, ciment, filler et fibres) pendant 15 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. Le temps de malaxage total est de 90 secondes.
Précautions d'emploi	Lors de l'ouverture des sacs ou la manipulation des sacs ouverts, il est conseillé de porter des gants et des lunettes de protection. Consulter la fiche de données de sécurité.
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre 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.»



Sika El Djazair,
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
www.sikaeldjazair.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08
Email: sika@sikaeldjazair.com



Annexe E – Formulation de béton selon la méthode (Sherbrooke)

Feuille de calcul:

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul.

Avant de présenter la pratique de la méthode, les paragraphes ci –dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la feuille de calcul
Calculs:

Case1: Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie à la figure ;

Case2: Ecrire la quantité d'eau nécessaire, selon la figure ;

Case3: calculer la masse de liant ;

Case 4-1,4-2,4-3: Calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire ;

Case5: Reporter la masse un gros granulat trouvé à la figure ;

Case6: Ecrire la quantité d'aire piégée que l'on prévoit obtenir dans le BHP ;

Case7: Ecrire la quantité de superplastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

A cette étape, la seule information manquante est la masse de granulat fin qu'il faut utiliser. Cette valeur peut se calculer par la méthode des volumes absolus, c'est-à-dire que l'on soustrait de $1m^3$ le volume de tous les ingrédients déjà sélectionnés de façon à trouver le volume restant pour le granulat fin, ce qui se fait dans la colonne 2.

Case 8-1,8-2,8-3: calculer les volumes des différents ajouts cimentaires ;

Case9: Calculer le volume de gros granulat ;

Case10: Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégée en l/m^3 ;

Case11: Calculer le volume V_{sol} ;

Case12: Incrire la somme de tous les volumes déjà calculés ;

Case13: Calculer le volume de granulat fin en l/m^3 ;

Case14: Calculer la masse de granulat fin ;

Case15: Calculer la masse de solides dans le superplastifiant M_{sol} ;

Case16: Calculer le totale de toutes les masses, pour obtenir la masse volumique du béton.

Jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage

Case17: Multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1+E_h/100)$;

Case18: Soustraire la valeur trouvée à la case 17 de la valeur de la **case 5** ;

Case19: Calculer la masse SSS du granulat fin ;

Case20: Soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case14.
(Écrire la valeur en signe négatif)

Case21: Ecrire la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant (le signe négatif apparaît déjà dans cette case) ;

Case22: Ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau.

La composition finale de $1m^3$ de béton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case23: Ajouter la correction de l'eau ;

Case24: Ecrire le dosage en superplastifiant Vliq.

Gâchée d'essais : (Colonne 6)

Il nécessaire de fabriquer de (x) kg de béton, ce qui reprisant (x)/case16 = (f) m3 donc toutes les valeurs de la colonne (5) doivent être multipliées par (f).

Case25 à 29 : Multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur f ;

Case30: Calculer la masse de la gâchée d'essai en additionnant les masses des différents ingrédients du béton que l'on retrouve dans les cases 25 à 29.

Composition d'un béton à haute performance

GACHEE :

F_{c28} : MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G _c	%
ciment		
FS		

	%			
Granulat	G _{sss}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Gros				
fin				

Type your text
Type your text

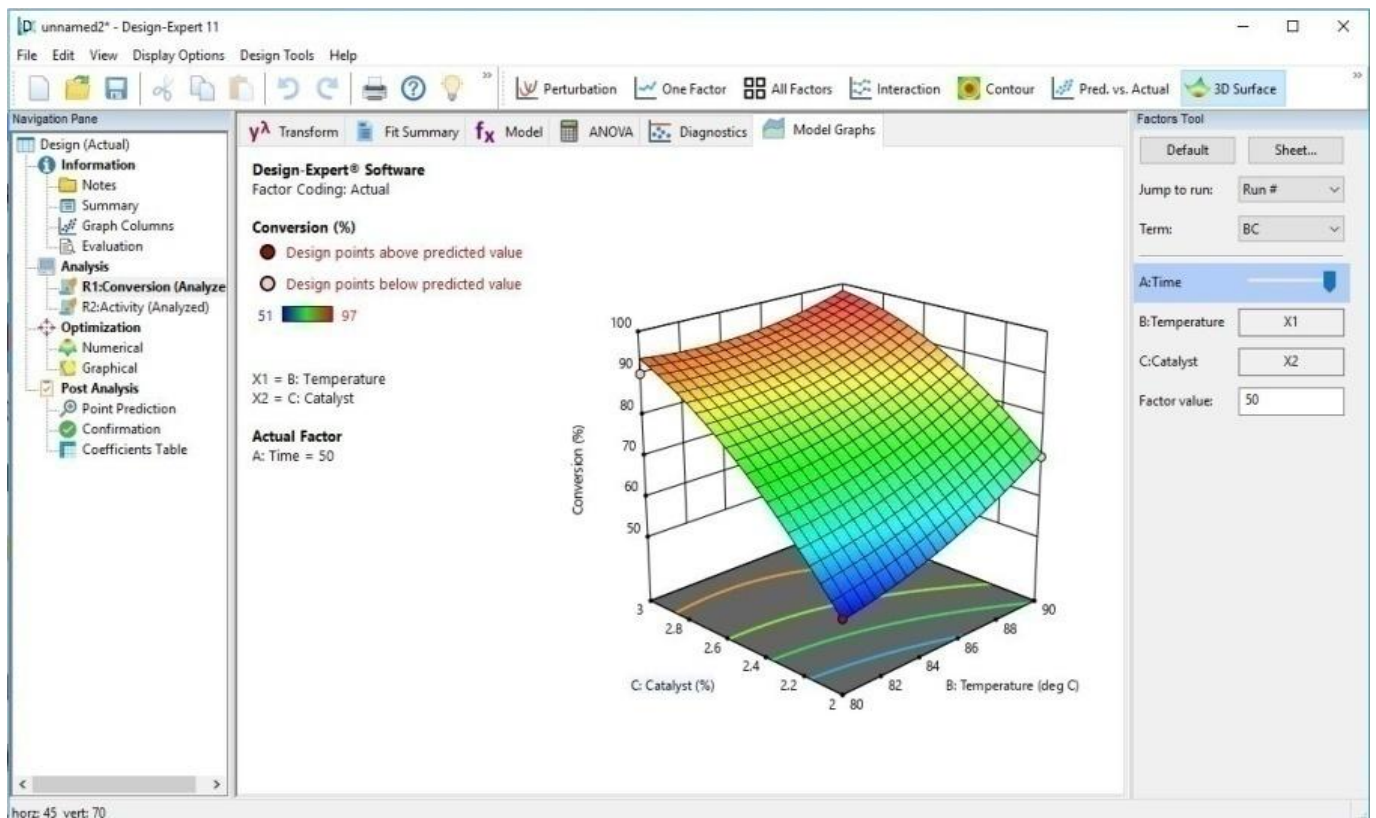
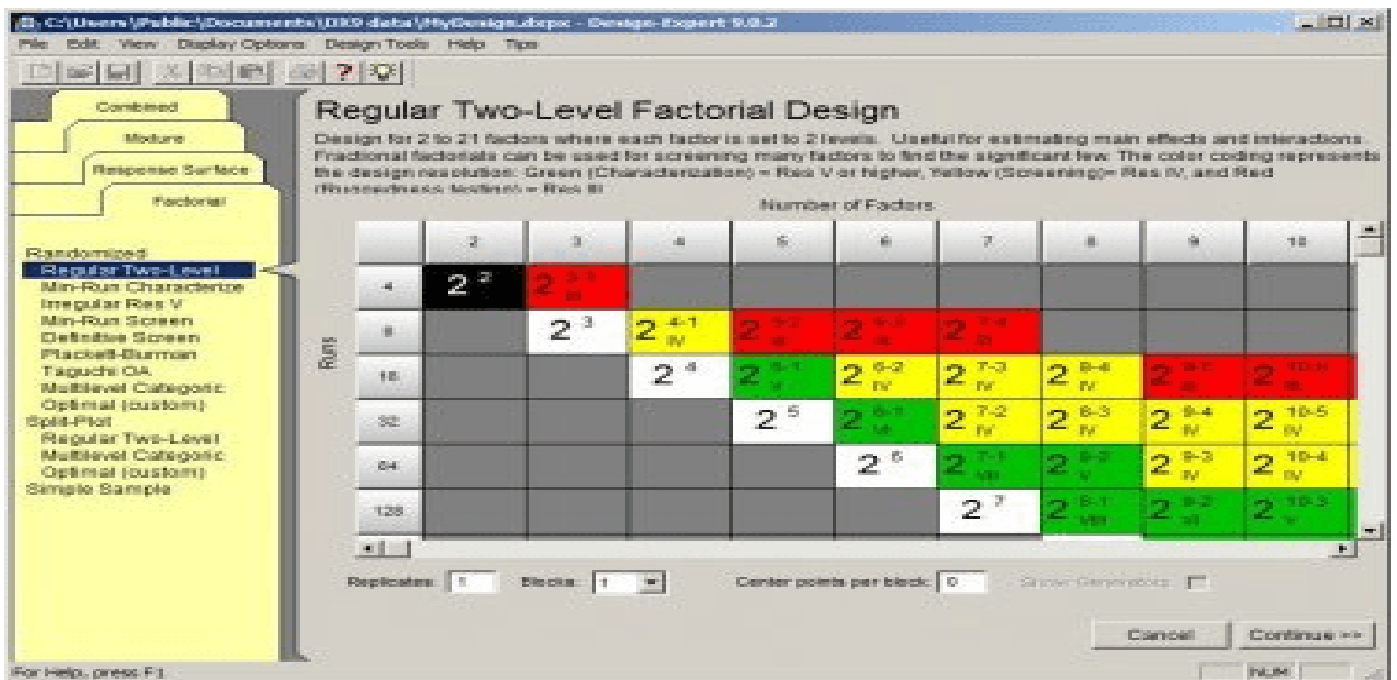
$$E_h = E_{tot} - E_{abs}$$

$$M = M_{sss} (1 + E_h)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
		[15]	[E] [24]	[E] [21]	[G] [11] [E]

Matériaux		1	2	3	4	5		6	
		Teneur Kg/m3	Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition			
						1 m3	Gâchée d'essais		
Eau	[1]	[2]	[2]	[2]		[23]	[25]		
Ciment	E/L = 0.	[3]	[4-1]	[8-1]		[4-1]	[4-1]	[26-1]	
			[4-2]	[8-2]		[4-2]	[4-2]	[26-2]	
			[4-3]	[8-3]		[4-3]	[4-3]	[26-3]	
Gros granulat	[5]	[9]	[5]	[18]	[17]	[27]			
Granulat fin		[13]	[14]	[20]	[19]	[28]			
Air	[6]	POURCENTAGE		[10]	0				
		%							
Super plastifiant	[7]	%		[11]	[15]	[21]	[24]	[V _{sp}] [29]	
Total				[12]	[16]	[22]			

Annexe F – Logiciel de modélisation (Expert Design)



Annexe G - Préparation et conservation des éprouvettes



Annexe H :
PUBLICATION

Experimental and numerical investigation of the workability and mechanical properties of High-performance fiber-reinforced fluid concrete (HPFRFC)

Laid Guermiti^{1*}, Dalila Benamara¹, Mohamed Guendouz²

¹Mechanical and Materials Development Laboratory, University of Djelfa, Djelfa, Algeria

²LME Laboratory, University of Medea, Medea, Algeria

*Corresponding authors:

(Guermiti_laid@yahoo.fr ; l.guermiti@univ-djelfa.dz)

Abstract

High workability, strength, durability and considerable ductility are becoming the major serious requirements on construction sites in recent years. High-performance fiber-reinforced fluid concrete (HPFRFC) is one of the modern concretes that can be used in some important and complicated structures with specific requirements. In this study, workability and mechanical properties of fluid High-performance concrete containing metal fibers have been investigated experimentally and numerically. A total of 13 mixtures investigated using a response surface (RSM) method. The input variables in the mixtures are the superplasticizer (SP) and metal fibers (MF) percentages. The percentage in SP takes as extreme levels 1.80% and 2.4%. The metal fibers quantity in the concrete ranging from 23 kg/m³ to 37 kg/m³. The slump flow was used to evaluate the rheological properties of mixture at fresh state. For the mechanical characterization, compressive and flexural strength tests were used in the hardened state. The obtained results show that the metal fibers reduce the workability of HPFC mixtures and improve their mechanical properties, especially the ductility. The slump flow (spreading) diameter of all mixtures varied between 400 mm and 580 mm, indicating a good deformability and mobility. Compressive and flexural strength ranged from 82 to 97 MPa and 4.5 to 7.53 MPa, respectively. The ductility was conferred on the HPFRFC composites, while the brittle failure is replaced by a ductile failure. Moreover, the numerical results show that HPFRFC can be produced based on optimized application of superplasticizer and metal fiber content. The optimization results indicate that with 30 Kg/m³ fibers and 2.4% superplasticizer, the maximum 28-day compressive and flexural strength are obtained, while meeting EFNARC workability indicators. This study proved that it is possible to suitably produce a dense and workable HPFRFC that are much thinner, slenderer, lighter, more durable and low cost-effective for practical application.

Key words: High-performance concrete; metallic fiber; superplasticizer; fluidity; mechanical strength; response surface method.

I. Introduction

High performance concrete is one of the most extensively used materials in all areas of modern construction. This type of concrete is known for its low porosity and a very dense micro-texture [1]. The main characteristics of high performance concretes, namely the compressive strength, modulus of elasticity, creep, permeability, have significantly been improved recently. The use of this type of concrete has considerably increased throughout the entire world, over the past few years [2]. Indeed, high performance concretes tend to progressively replace conventional concretes in many applications.

On the other hand, High performance fluid concrete is a new concrete that met the requirement of actual modern structures. This type of concrete can easily flow to reach all points and corners of the formwork under the effect of its own weight, and without vibration. For this reason, the characteristics of the aggregates used and the proportions of the mixtures for this type of concrete have previously been determined by experimentation in order to provide the mixture with the most appropriate fluidity [3, 4]. The filling capacity can be used to define the workability and fluidity of high performance fluid concrete (HPFC). This characteristic depends on two factors: deformability and resistance to segregation [5, 6]. In this regard, Ozawa and all, proved the existence of a relationship between the filling capacity and the slump of concrete [7]. It is important to know that for low values of slump, the flow would tend to stop due to the increased friction between the particles of concrete. Moreover, for higher values of slump, the aggregates can

on the contrary separate more easily from the mortar, and consequently the flow of concrete can be stopped due to the formation of bridges of aggregates resting on obstacles, which can lead to segregation in concrete. Further, in order to achieve maximum filling capacity, it is required to obtain maximum deformability and minimum segregation [5]. To achieve high performance for fluid concrete, it is required to reduce the porosity of the mixture either by acting on the particle size by adding ultrafine particles [8-10], or by including an admixture, such as a super-plasticizer [11, 12], or both at the same time, as is commonly the case.

Currently, Fiber-reinforced concrete constructions have become increasingly widespread throughout the world. Therefore, several technical guidelines have been developed and established to define fiber requirements for structural or non-structural applications in concrete [13]. Therefore, high-performance fiber-reinforced fluid concrete (HPFRFC) is a new generation of high-performance concrete which has multiple benefits when used in areas with high reinforcement density. This new type of concrete is exceptional both in terms of fluidity and mechanical behavior. The workability of this concrete is acceptable for some structures; it is between that of traditional concrete and that of self-compacting concrete. In addition, it was shown that this concrete is easy to implement and can be used for both horizontal (pre-slabs, slabs, and floors) and vertical (walls, and Columns) applications. This type of concrete has a compressive strength greater than 50 MPa for a maturity of 28 days, with a water-to-cement (W/C) ratio less than 0.4

[14]. It is worth emphasizing that the use of this type of concrete in most structures of works of art ought to be accompanied with adequate steel reinforcement. Moreover, it should be noted that the high ductility of this high performance fluid concrete (HPFC) can be achieved by suitably choosing the type and size of the aggregate used [15-17] or by adding fibers [18, 19]. Furthermore, adding fibers to high performance fluid concretes provides significant residual strength after cracking, increases ductility and also improves durability [20]. Note that these properties depend on a number of factors like the aspect ratio (fiber length/equivalent diameter), and the volumetric percentage of fibers; they are also dependent on their physical and mechanical properties. Therefore, this type of concrete can certainly be employed in building structures, such as engineering structures, that are often subjected to high stresses.

In order to reducing the number of experimental tests, and therefore reduce the research expenses, statistical methods are often used to determine the optimum mixture and achieve the optimal value of each variable in the concrete mixtures. In this context, several researchers have adopted the statistical approach for the experimental design and optimization in concrete technology [21, 22]. The Response Surface Method (RSM) is one of the most statistical methods used providing satisfactory results when used to determine the quantity of the variables used in concrete [23, 24]. The evaluation of impact of each variable and the optimization of the mixture by using of this method has been confirmed by several studies [25–27]. Nowadays, this method is used to design experiments in variety of applications [28].

In this study, the RSM method Central Composite Design (CCD), which is one of the RSM methods, was used for the purpose

of optimizing and exploring the relationships between various controlled variables (factors), such as the percentage of superplasticizer (SP), and the metal fiber (MF) dosage, as well as their effects on the targeted responses, i.e. spreading, compression, and three-point flexural. Therefore, the analysis of variance (ANOVA), a collection of statistical models, was used to assess the significance of the models developed by the *response surface method* (RSM) as well as their correlation coefficients (R^2).

II. Experimental program

II.1. Properties of the materials used

Ordinary Portland Cement CEM I 42.5R that meets the Algerian Standard (NA442-2013) [29] was used in the present study. The physico-mechanical properties and chemical analysis of this cement are summarized in Table 01 and 02 respectively, and its EDX analysis is presented in Figure 01. Silica fume (SF) that satisfies the requirements of the ASTM C1240 Standard [30] was used as a cementitious material. Their chemical and EDX analysis are presented in Table 02 and Figure 02, respectively.

Siliceous dune sand with a maximum size of 5 mm was used as fine aggregate. The specific density, absorption rate and fineness modulus of this sand calculated according to the ASTM C128 and ASTM C136 Standards [31, 32], are equal to 2.64, 0.46% and 2.34, respectively. The EDX analysis of this sand is presented in Figure 03.

Two crushed stone fractions (G3/8 and G8/15) were used as coarse aggregates. The specific density and absorption rate of these aggregates were calculated according to the ASTM C127 standard [33] and were found equal to 2.67 and 2.12%, respectively. Figure 4 shows the particle size

distributions of the sand and gravel used in this study. A polymer-based superplasticizer named MEDAFLOW Re25 with a specific density of 1.08 was used in this

study for improving the workability of the mixes. Double Hooked end Steel Fibers have been used for all mix designs (Fig. 5).

Table 1. Physical and mechanical properties of the used cement

Characteristics	CEM I 42.5 R
Specific density (kg/m ³)	3140
Normal consistency (%)	25.8 – 26.4
Hot expansion (mm)	0.25 – 1.0
Initial set	150 – 190
Final set	220 – 250
Compressive strength (MPa)	
2 days	20 – 29
28 days	42.5 – 52.5

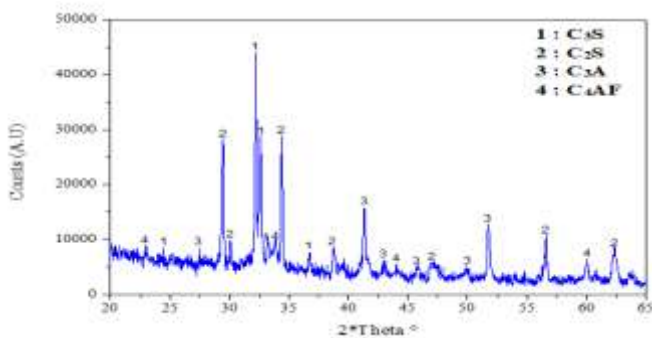


Figure 1. EDX analysis of cement used.

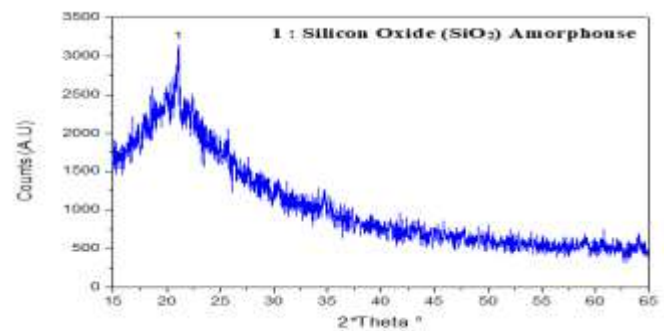


Figure 2. EDX analysis of silica fume used.

Table 2. Chemical analysis of cement and silica fume used

Chemical Constituent (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SrO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	SO ₃	Loss
Cement	20.54	4.45	3.41	64.10	3.01	0.67	0.18	0.06	0.25	0.15	0.02	2.22	1.2
Silica fume	90.45	1.25	0.19	0.15	0.29	0.68	0.16	-	0.04	0.26	0.01	0.29	0.04

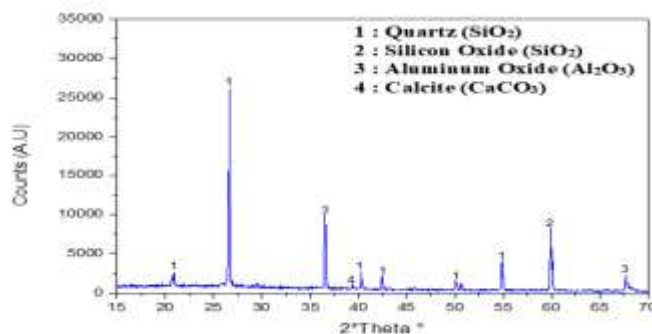


Figure 3. EDX analysis of sand (0/5) used .

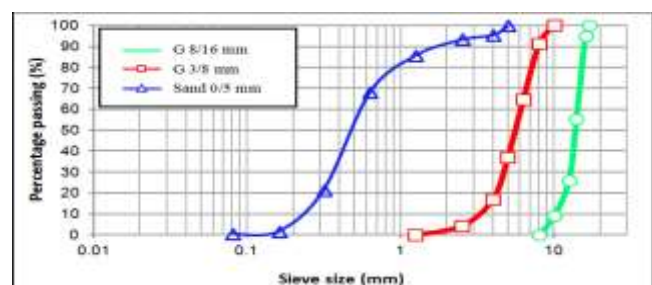


Figure 4. Grading curves of sand and

gravels used.

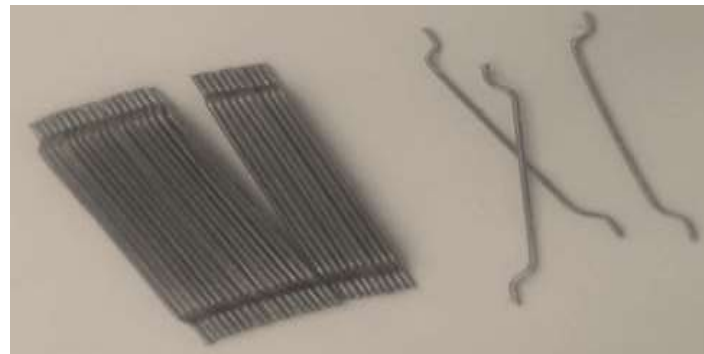


Figure 5. Double Hooked end Steel Fibers used.

Table 3. Properties of double Hooked end Steel Fibers used

Characteristics	
Tensile Strength (MPa)	> 1100
Density (kg/m ³)	7800
Fiber Length (L), (mm)	30
Diameter (d), (mm)	0.55
Aspect Ratio (L/d)	54.55

II.2. Mix proportions of HPFRFC

The adopted reference formulation in this study to determine the different constituents of reference mixture is that of base formulation for high performance concrete [34], with a fixed water-to-binder (W/B) ratio equal to 0.30 (Table 4). The dosages of superplasticizer was optimizing after to achieving an appropriate initial workability.

In the rest of this work, the formulation of the proposed HPFRFC mixtures was then developed based on the reference formulation. In order to assess the effect of the two factors to be controlled, namely the percentage of superplasticizer (SP) and the dosage of metallic fibers (MF), The cement and water quantities were kept constant in all the studied mixes., and the dosage of

superplasticizers and metallic fiber were changed compared to the levels provided by the CCD method. In this study, the superplasticizer is in the range of 1.8–2.4 % of the total weight of the powder material and metallic fibers is in the range of 23 kg/m³ to 37 kg/m³ of concrete are selected and varied, as presented in Table 5.

Response Surface Methodology (RSM), which presents a variety of response surface designs [35], was used in this study for the purpose of analyzing and optimizing the responses that are influenced by the variables under consideration. The Central Composite Design (CCD) was also used in this study to determine the number of the studied experiments. The CCD is an augmented version of the factorial plane, with central and axial points [36].

Furthermore, the Design-Expert version-7 software was used in the experimental design, statistical analysis, mathematical modeling and optimization of process variables for the studied High-performance fiber-reinforced fluid concrete (HPFRFC). Firstly, the critical variables are determined in this method. For modeling and analyzing these impacts variables, mathematical and statistical techniques are used afterwards [37].

The relationship and interaction between the input factors (percentage of superplasticizer and metallic fiber content), and responses for the properties of concrete in the fresh and hardened state were obtained using the analysis of variance (ANOVA) [38, 39]. Figure 6 shows the classic CCD process for the variables.

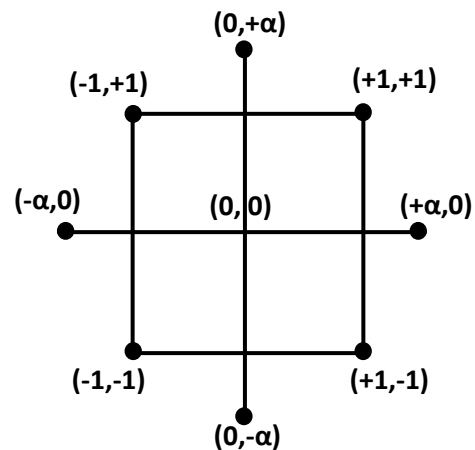


Figure 6. Central Composite Design (CCD) for two variables [40].

Table 4. Mix proportions of reference HPFC mixture

Mixture	W/B Ratio	MF (Kg/m ³)	SP (%)	Constituent (Kg/m ³)					
				Water	Cement	SF	Sand	G (3/8)	G (8/16)
HPFC	0.30	-	1.50	145	439.39	43.94	816.02	347.97	646.17

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} \beta_{ji} X_i X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \varepsilon \quad (1)$$

The factorial plane points (\pm) are represented by the four corner points. These points define the boundaries of the operability zone inside which the optimum is supposed to exist. The previous points are generally outside the boundary line. Regarding, the axial design points ($\pm\alpha$), they are denoted by the four central points. The axial points define the operability zone, and the zone of interest is inside the operability zone [40].

It is worth pointing out that the response models used in this study were chosen in accordance with the fresh and hardened properties of the HPFRFC, with variable factors such as the superplasticizer percentage and metal fiber dosage. By choosing the most appropriate model, and determining the best fitting conditions, the response surface model (RSM) can then

easily be described. Moreover, the quadratic equations were selected for the model that is also described by Equation (1).

Where y represents the response function;

$$\sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \varepsilon$$

is the quadratic effect of one single variable; $\sum_{i < j} \sum_{i < j} \beta_{ji} X_i X_j$ refers to the interaction effect between two variables; β_0 , β_i , β_{ii} , and β_{ij} are the regression coefficients; X_i and X_j are the factors under study; k represents the number of factors; and finally ε is the observed noise error.

In this work, 13 experimental trials were carried out, for the two variables SP and FM, using the central composite design (CCD) method. It should also be noted that

the percentage of SP takes as extreme levels 1.80% and 2.40%, with a dosage of metallic fibers (FM) ranging from 23 kg/m³ to 37 kg/m³, and a fixed amount of fumed silica (SF) that is equal to 10% of cement weight. However, the percentages of the other

components in the concrete mixture remain unchanged. Moreover, the binder dosage is considered an invariable factor; it was set at 483.33 kg/m³ of concrete (Table 5).

Table 5. Mix proportions of HPFRFC mixtures

Mixture No	SP (%)	MF (Kg/m ³)	Water (L/m ³)	Cement (Kg/m ³)	SF (Kg/m ³)	Ratio W/B	Sand (Kg/m ³)	G(3/8) (Kg/m ³)	G(8/16) (Kg/m ³)
HPFRFC1	1.90 (-1)	25 (-1)	145	439.39	43.94	0.30	761,33	367.5	682.5
HPFRFC2	1.90 (-1)	35 (+1)	145	439.39	43.94	0.30	761,33	367.5	682.5
HPFRFC3	2.30 (+1)	25 (-1)	145	439.39	43.94	0.30	757,47	367.5	682.5
HPFRFC4	2.30 (+1)	35 (+1)	145	439.39	43.94	0.30	757,47	367.5	682.5
HPFRFC5	1.80 (-1.414)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	762,29	367.5	682.5
HPFRFC6	2.40 (+1.414)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	756,79	367.5	682.5
HPFRFC7	2.10 (0)	23 (-1.414)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5
HPFRFC8	2.10 (0)	37 (+1.414)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5
HPFRFC9	2.10 (0)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5
HPFRFC10	2.10 (0)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5
HPFRFC11	2.10 (0)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5
HPFRFC12	2.10 (0)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5
HPFRFC13	2.10 (0)	30 (0)	145	439.39	43.94	0.30	759,40	367.5	682.5

II.3. Manufacturing and tests

To obtain the fluidity and mobility of mixture in an unconfined environment, after the mixing process was completed, the slump flow of the mixtures was measured immediately on the fresh concretes, by using the concrete slump cone test (Fig. 7), according to the requirements and recommendations of ASTM C143 standard for slump test [41], These two quantities can be determined by measuring the Slump or the spread. The slump flow shows the spread of fluid concrete in the horizontal direction without the presence of any obstacles and the final diameter was measured in the slump flow test $(D1+D2)/2$.



Figure 7. Slump flow test for fresh HPFRFC mixes.

After testing HPFRFC mixes in fresh state, a number of specimens were then cast in lubricated molds without any vibration and

compaction in order to determine the mechanical properties of different mixtures at hardened state.

To determine the compressive strength of mixtures (Cs) at 28 days, three cube samples with dimensions of $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ were used for each mixture according to BS EN 12390-3 standard [42]. The flexural strength (Fs) at 28 days was assessed on three prismatic specimens of dimensions $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$, according to BS EN 12390-5 standard [43] (Fig. 8 and 9).

After filling all the molds, the studied samples were kept at environmental laboratory with a temperature of approximately 21°C , and after 24 h, were taken out of the molds and placed in water saturated lime at a temperature of 21°C until the age of testing.



Figure 8. Compressive strength test for hardened HPFRFC mixes.



Figure 9. Flexural strength test for hardened HPFRFC mixes.

III. Results and discussion

III.1. Experimental results

The rheological (slump flow and spreading) assessing by the slump flow test, and mechanical (28 days compressive and flexural strengths) results of the control high-performance fluid concrete (HPFC) as well as those of the high-performance fiber-reinforced fluid concrete (HPFRFC) are summarized in table 6. From this table it is clearly shown that the spreading values in the studied mixtures are in the range of 40–58 cm. On the other hand, the 28-day compressive and flexural strength values are in the range of 77 – 97 and 4.50 – 7.53 MPa, respectively.

Table 6. Rheological and 28 day's mechanical test results of HPFRFC.

Mixtures	Slump flow (cm)	Sp reading (cm)	Cs (MPa)	Fs (MPa)
HPFC	15	-	82	4.50
HPFRFC1	-	49	93	6.54
HPFRFC2	-	40	77	7.21
HPFRFC3	-	51	89	7.30
HPFRFC4	-	44	85	7.53
HPFRFC5	-	46	84	6.80
HPFRFC6	-	58	92	7.45
HPFRFC7	-	55	97	7.05
HPFRFC8	-	43	81	7.37
HPFRFC9	-	50	87	7.00
HPFRFC10	-	50	87	7.00
HPFRFC11	-	50	87	7.00
HPFRFC12	-	50	87	7.00
HPFRFC13	-	50	87	7.00

III.2. Mathematical models

The affectation of the independent studied variables on the response values for each experimental test is provided by the ANOVA analysis and its statistical parameters (CCD method) are shown in Tables 7 and 8, respectively. The effect level of the variables on the experimental results is determined by the F-value and p-value. The effect of the variables on the response is considered higher with higher F-value and lower p-value.

The p-value indicates the significance of the tested defined parameters in the results values. If a variable's p-value is <5 %, it is considered as a significant variable and has a significant effect on the test response. However, the variables with p-value greater than 0.05 do not have significant effect on the response and are neglected to improve the accuracy of the proposed model. In this study, the experimental results modeling and ANOVA analysis are performed with an error level of 4 %.

Table 7. Variance analysis (ANOVA) for the regression models

Response	Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F-value	Probability error	
Spreading	Model	244.34	5	48.87	6.15	0.0169	Significant
	Residual	55.66	7	7.95			
	Lack of Fit	55.66	3	18.55			
	Pure Error	0.00	4	0.00			
	Total	300.00	12				
Cs	Model	293.64	5	58.73	20.50	0.0005	Significant
	Residual	20.05	7	2.86			
	Lack of Fit	20.05	3	6.68			
	Pure Error	0.00	4	0.00			
	Total	313.69	12				
Fs	Model	0.86	5	0.17	41.09	< 0.0001	Significant
	Residual	0.03	7	4.18E-003			
	Lack of Fit	0.03	3	9.76E-003			
	Pure Error	0.00	4	0.00			
	Total	0.89	12				

Table 8. Statistical parameters from the analysis of variance for the regression models

Response	R ²	Adjusted R ²	Coefficient of variation. %	Standard of deviation	Adequate Precision	PRESS
Spreading	0.81	0.68	6.00	2.82	7.30	395.82
Cs	0.94	0.89	1.94	1.69	15.90	142.57
Fs	0.97	0.94	0.91	0.07	19.12	0.21

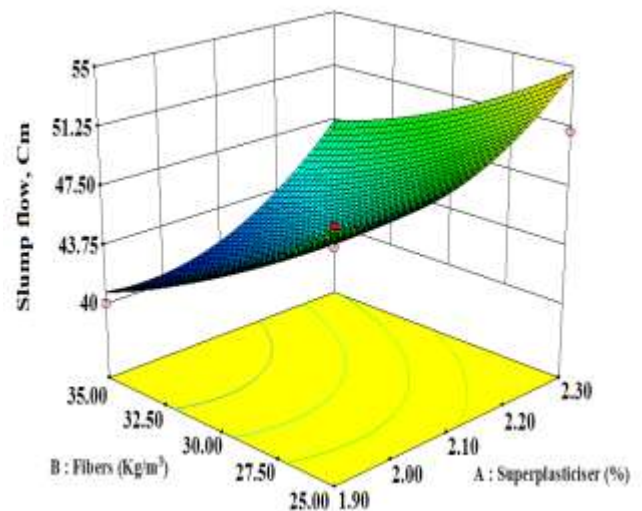
PRESS: predicted residual error sum of squares.

The determination coefficient (R²) for all tests, confirms the correlation between the experimental data and the predicted responses. Where, the closer the value of this coefficient to the number one, the more accurate the proposed model [44]. In this study, the correlation coefficients, of all test results, were relatively high (Table 8), which testifies to a good correlation between the obtained experimental results and the values provided by the model under consideration. Note also that all these coefficients were obtained by a regression method that is based on the least squares optimization criteria.

III.3. Analysis of modelling results

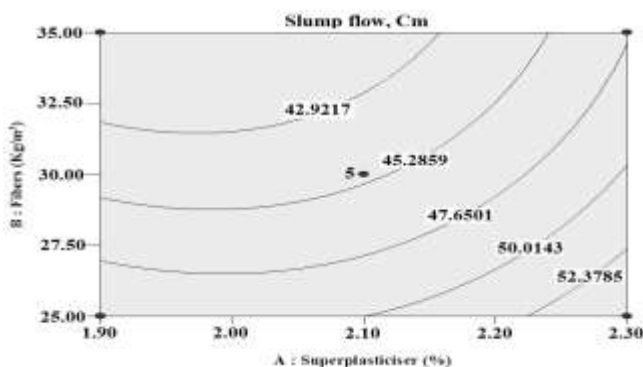
III.3.1. Spreading (cm)

Figures 10 (a) and (b) respectively illustrate the iso-response curves (2D and 3D) for the superplasticizer and fiber content on the spreading value of HPRFC mixtures.



b) 3D surface diagram.

Figure 10. RSM Analysis diagrams for representing slump flow (spreading).



a) 2D Contour diagram.

It is clearly shown from Figure 7 that the spreading increases as the superplasticizer (SP) dosage goes up, and decreases with the increase in the metallic fibers (MF) content ; this was done while keeping the values of the water-to-binder (W/B) ratio constant in the domain of the studied plane.

The improvement in the spreading is certainly due to the presence of the superplasticizer which plays the role of plasticizer; it can also be attributed to the

compatibility of the polymer contained in the superplasticizer with the cement used. This would then have a positive effect on the rheology of concrete. In this study, the spread may vary between 40 and 58 cm.

On the other hand, it was revealed that the incorporation of metallic fibers leads to a reduction in the workability of concrete. This workability decline was found to be proportional to the amount of fibers added. Moreover, it was also found that the inclusion of metallic fibers in concrete causes blocking problems. This phenomenon is probably due to the shape and rigid nature of metal fibers, which is not the case for synthetic fibers which are more flexible, as previously mentioned by Grunewald [45].

As reported by Güneysi and Grabois et al. [46, 47], increasing fibres in percentages have a significant negative effect on the fresh properties of concrete as fibres act as a three-dimensional web negating flow. And therefore, act as a barrier to flow thus dosage must be optimized so as to provide optimal performance for both fresh and mechanical properties. These results are in accordance with the results obtained by other researchers [28,46,48-50], confirming that increasing metallic fiber content negatively effects the concrete workability. Aslani and Kelin [51] observed the same

results and confirmed that increasing superplasticizer content can help overcome the flowability reduce.

It should be pointed out that the studied HPFRFC mixes are characterized by a spread varying between 40 and 58 cm, indicating that this type of concrete has a consistency that varies between that of concrete S3 which is quite compact and elastic, and that of concrete S5 which is very fluid which can make it more manageable and easier to place [52]. In addition, these concretes are characterized for their very high deformability; they are also known for their ease of implementation under the effect of their own weight, without vibrations, even in the case of dense reinforcement, as previously reported by the French Association of Civil Engineering (AFGC, 2000) and other authors [52, 53]. As presented in Table 8, the modeling used made it possible to write a model that was used to predict the responses in the entire field of study and presented by the quadratic equation (Eq. 2). This equation has been derived to predict the amount of spreading as function to the superplasticizer and metallic fiber content. The value of R^2 and adjusted R^2 coefficients for this experiment are 81% and 68%, respectively.

$$\text{Spreading } Cm = +45.00 + 2.87A - 4.12B + 0.50AB + 2.37A^2 + 0.88B^2. \quad (2)$$

$$\text{Compressive strength, MPa} = +87.00 + 1.91A - 5.33B + 3.00AB + 0.12A^2 + 0.38B^2. \quad (3)$$

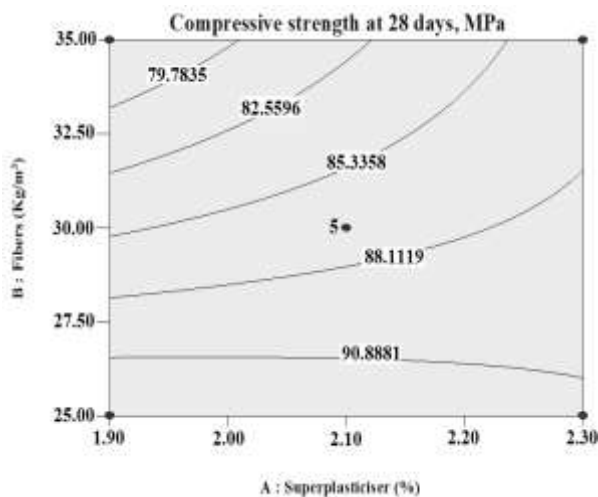
III.3.2. Compressive strength

Figures 11 (a) and (b) present respectively the iso-response curves (2D and 3D) for the superplasticizer and fiber content effect on the compressive strength value of HPFRFC mixtures.

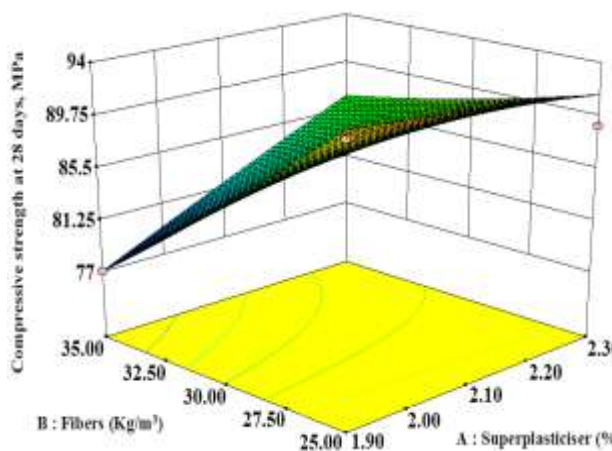
As presented in Table 8, the modeling used made it possible to write a model that was used to predict the responses in the entire

field of study and presented by the quadratic equation (Eq. 3). This equation has been derived to predict the amount of compressive strength as function to the superplasticizer and metallic fiber content. The value of R^2 and adjusted R^2 coefficients for this experiment are 94% and 89%, respectively. According to Cheng Yuan et al. [54], the compressive strength of metal fiber-reinforced concretes is

always higher than that of non-fiber reinforced concrete, as is clearly confirmed by the results obtained and presented in Table 6. In addition, it was noticed that the mechanical behavior of high-performance fiber-reinforced fluid concretes (HPFRFC) evolved with the percentage of superplasticizer (SP) and the proportion of metallic fibers (MF) used, except for the HPFRFC2 and HPFRFC8 mixes where a slight decrease in the compressive strength values was noticed in comparison with the reference mixture (HPFC); this decrease was respectively about 7% and 1% for these two mixes.



a) 2D Contour diagram



b) 3D surface diagram.

Figure 11. RSM Analysis diagrams for representing compressive strength.

Regarding the other mixtures, their compressive strength increased by around 18%, which proved that there was good compatibility between the super-plasticizer (Medaflo Re 25), the type of cement, the slenderness of the metallic fibers ($\phi < 0.02$), and the quantity incorporated. It is important to emphasize that short fibers, when used in low dosage, do not pose the problem of entanglement and the formation of pilot “sea urchins”, which is not the case when fine fibers are used even in large quantities. Therefore, the presence of fibers in the matrix slightly increases the porosity, but does not cause any drop in the compressive strength.

This means that the incorporation of metal fibers, with a good orientation and a homogeneous distribution within the matrix, significantly improves the ductility of the material and also enhances the cracking threshold (Figure 12.b). These findings are in good agreement with those reported by other authors [20, 28, 55].

Through the visual examination of crashed specimens, it can be seen also that most of the cubic specimens showed cracking along a line at roughly 45° to the axis, near the ends (Figure 12.a).



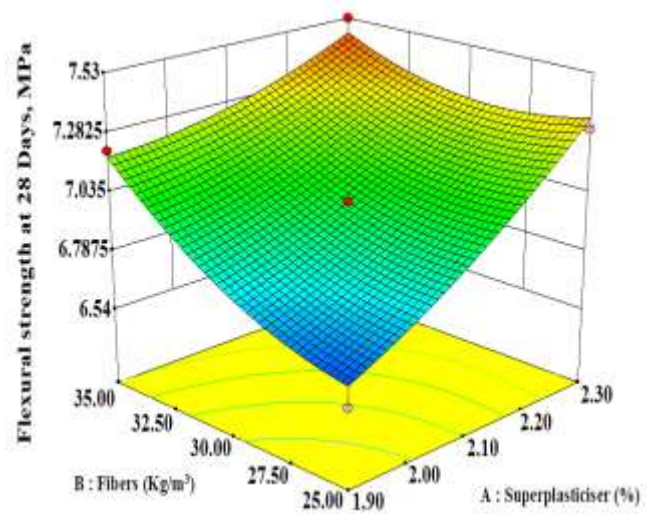
a) HPFC.



b) HPFRFC.

Figure 12. Failure modes of cube specimens at 28 days compressive test.

Therefore, it can be said that incorporating fibers in the cementitious matrix slows down the development of microcracks, which induces a significant increase in the compressive strength; this is in agreement with the findings of other researchers [28, 56].



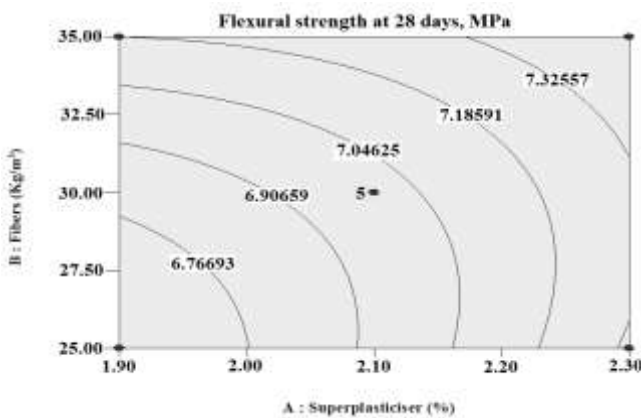
b) 3D surface diagram

Figure 13. RSM Analysis diagrams for representing Flexural strength.

$$\text{Flexural strength, MPa} = +7.00 + 0.25A + 0.17B - 0.11AB + 0.057A^2 + 0.099B^2. \quad (4)$$

III.3.3. Flexural strength

Figures 13 (a) and (b) present respectively the iso-response curves (2D and 3D) for the superplasticizer and fiber content effect on the flexural strength value of HPFRFC mixtures.



a) 2D Contour diagram

As presented in Table 8, the modeling used made it possible to write a model that was used to predict the responses in the entire field of study and presented by the quadratic equation (Eq. 4). This equation has been derived to predict the amount of flexural strength as function to the superplasticizer and metallic fiber content. The value of R^2 and adjusted R^2 coefficients for this experiment are 97% and 94%, respectively.

The results illustrated in figures 13.a and 13.b suggest that the flexural strength is quite high for all the concrete mixtures under study, and are in good agreement with those found in the literature [55-57]. Indeed, a clear flexural strength increase was observed for all the mixtures under study.

It can be clearly seen from figure 10, that the flexural strength increases as the superplasticizer (SP) amounts and metal fiber (MF) dosages went up. This increase, which is between 45 and 67%, can certainly be attributed to the presence of metallic fibers in the matrix which play a triple role. First of all, they allow the mobilization of a greater part of the elastic energy within the material; then, they increase the energy consumed in the vicinity of cracks (high tenacity); finally, they serve as stitching elements on the lips of the cracks. Note also that after the formation of the cracks, the lips remain connected by the fibers (dowel action).

During the flexural tests (figure 14), the high performance fluid concrete (HPFC) cured specimens showed a brittle type of failure (sudden failure); this was certainly due to its low tensile strength. However, for all the composite concretes, including different fiber contents, a ductile fracture was observed with a densification of microcracks. This may probably be attributed to the addition of metal fibers which contribute to stop the rapid propagation of cracks. The same results were found by Majain et al. [28, 57-61].



a) HPFC.



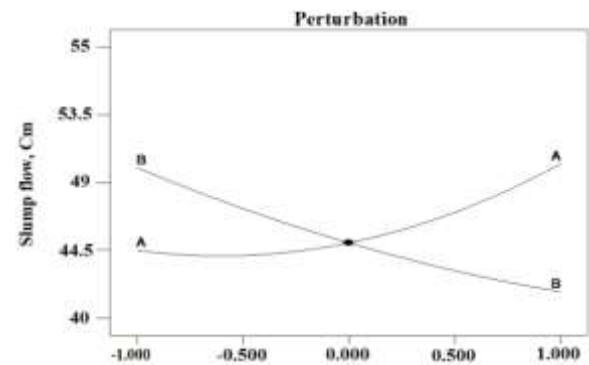
b) HPRFC.

Figure 14. Typical fracture patterns of specimen in flexural strength.

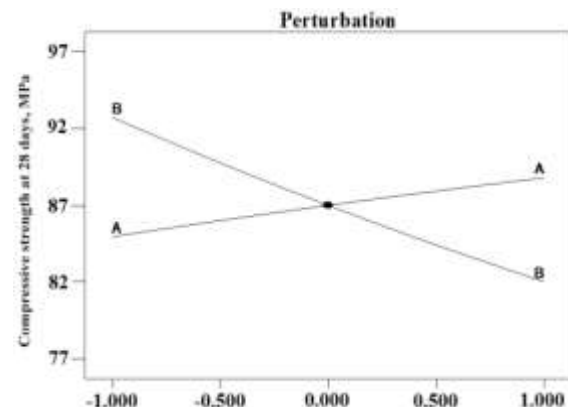
III.4. Perturbation graphs

The perturbation diagrams illustrated in figures 15.a, 15.b and 15.c indicate that B

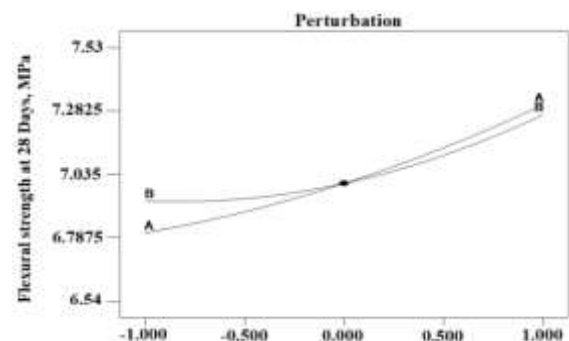
has a negative effect, which means that when the proportion of metal fibers increases, the flow and compressive strength decrease, as was previously mentioned when the effect of fibers on these parameters was studied. On the other hand the effect of A and B for the case of bending (flexural) are positive in parallel.



a) Slump flow (spreading).



b) Compressive strength.



c) Flexural strength.

Figure 15. Perturbation plot.

IV. Conclusions

This study was conducted with the aim of answering some questions relating to the evolution of the rheological and mechanical properties of high performance fiber-reinforced fluid concrete. The main conclusions drawn from this work are:

- The workability of the studied HPFRFC mixtures is with a spread varying between 40 and 58 cm. Indicating that this type of concrete has a consistency that varies between that of S3 concrete and that of S5 concrete which can make the HPFRFC more manageable and easier to place.
- The incorporation of metallic fibers leads to reduce the workability of concrete and the decline in this workability was found to be proportional to the amount of fibers added.
- The amounts of superplasticizer (SP) and metallic fibers (FM) used have a significant effect on the mechanical properties of HPFRFC. The flexural and compressive strengths of HPFRFC are significantly greater than those of control high performance fluid concrete (HPFC).
- An improvement in the failure mode was observed, with a certain ductility conferred on the composite concretes during the mechanical tests. Indicating a replacement of the brittle failure by the ductile failure.
- Based on the data obtained from the response surface methods, a high correlation between the flexural strength and the amounts of components incorporated in concrete could be developed using the generalization capabilities. Some equations were developed and the results found were validated by means of ANOVA; the significance level of the model developed was greater than 95%.

- According to the models established, it was shown that our experimental results were well correlated with those obtained with the theoretical models; this was true for all the selected responses.
- The study proved that it is possible to suitably produce a dense and workable HPFRFC that are much thinner, slenderer, lighter, more durable and low cost-effective for practical application. It was revealed that the considerable reduction in the thickness of the structures allows for a significant economic gain.

Références

- [1] Neville, A-M. Properties of Concrete, Eyrolles Editions, 2000, Paris, France.
- [2] Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra-high performance concrete: part I. Raw materials and mixture design. Construction and Building Materials., 2015 ; 101(1) :741-751.
- [3] Guendouz, M., Boukhelkhal, Dj. Properties of flowable sand concrete containing ceramic wastes, Journal of Adhesion Science and Technology, 2019, 33(24), 2661-2683.
- [4] Hajime Okamura, Self-Compacting High-Performance Concrete, Concrete International, Volume: 19, Issue: 7, 1997.pp. 50-54.
- [5] Joumana Yammine, Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, Thesis, University of Higher Normal School in Kashan, 2007.
- [6] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj.; Bourdot, A. Recycling of floor tile waste as fine aggregate in flowable sand concrete. Advances in Green Energies and Materials Technology. Springer Proceedings in Energy. Springer, Singapore, 2021.
- [7] Ozawa K., Kunishima M., Maekawa K., Okamura H., Challenge for high performance concrete, Proceedings conference on High performance concrete, University of Tokyo, September, 1991, pp. 5-17.
- [8] Khalifa S. Al-Jabri, Makoto Hisada, Salem K. Al-Oraimi, Abdullah H. Al-Saidy, Copper

slag as sand replacement for high performance concrete, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) 483–488.

[9] Xinpeng Wang, Rui Yu, Qiulei Song, Zhonghe Shui, Zhen Liu, Shuo Wu, Dongshuai Hou, Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density, *Cement and Concrete Research*, Volume 126, December 2019, 105921.

[10] Boukhelkhal, Dj.; Boukendakdji, O.; Kenai, S.; Kadri, E.H. Combined effect of mineral admixture and curing temperature on mechanical behavior and porosity of SCC. *Adv. Conc. Const.* 6 (1) (2018) 69-85.

[11] A.Rasheed , M. Usman H. Farooq, A Hanif, Effect of Super-plasticizer Dosages on Fresh State Properties and Early-Age Strength of Concrete, *Materials Science and Engineering* 431 (2018) 062010.

[12] Muhsen Salem, Salahaldeen Alsadey, Megat Johari, Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete, *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, (Jul. - Aug. 2016), PP 153-158.

[13] Piotr Smarzewski, Influence of basalt-polypropylene fibres on fracture properties of high performance concrete, *Composite Structures*, Volume 209, 1 February 2019, Pages 23-33.

[14] Forster SW. High-performance concrete – stretching the paradigm. *Concr Int Oct* 1994;16(10):33–4.

[15] Zhou, F.P., Barr, B.I.G., Lydon, F.D., 1995. Fracture properties of high-strength concrete with varying silica fume content and aggregates. *Cement and Concrete Research* 25, 543–552.

[16] Tasdemir, C., Tasdemir, M.A., Lydon, F.D., Ban, B.I.G., 1996. Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete. *Cement and Concrete Research* 26, 63–68.

[17] Nasir Kabir, Sani Aliyu, Mohammad Abdu Nasara, Adamu Umar Chinade, Aminu Shehu, Characteristics of Different Type of Coarse Aggregate on Properties of High Performance Concrete, *Sustainable Structure and Materials*, Vol. 2, No .1, (2019) 88-96.

[18] Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ., Şahin, Y., Combined effect of silica fume and steel fiber

on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials*, 2008, 22, 1874–1880.

[19] Smarzewski, P., Influence of basalt-polypropylene fibers on fracture properties of high performance concrete. *Composite Structures*, 2019, 209, 23– 33.

[20] Osama Zaid, Faisal M. Mukhtar, Rebeca M-García, Mohammad Galal El Sherbiny and Abdeliazim M. Mohamed, Characteristics of High-Performance Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Utilizing Mineral Filler, *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 16, e00939.

[21] M. Khashaa Mohammed, A. Ismail Al-Hadithi, M. Mohammed, Production and optimization of eco-efficient self-compacting concrete SCC with limestone and PET, *Construction and Building Materials*, 2019, 197, 734–746.

[22] M. Aziminezhad, M. Mahdikhani, M. Memarpour, RSM-based modeling and optimization of self-consolidating mortar to predict acceptable ranges of rheological properties, *Construction and Building Materials*, 2018, 189, 1200–1213.

[23] N. Sultana, S. Zakir Hossein, M. Shah Alam, M. Hashish, M., Islam, An experimental investigation and modeling approach of response surface methodology coupled with crow search algorithm for optimizing the properties of jute fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 2020, 243, 118216.

[24] I. Ferdosian, A. Camoes, Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology, *Cem. Concr. Compos.* 2017, 84, 146–156.

[25] Megan Weyers, Optimised mix composition and structural behaviour of ultra-high-performance fibre reinforced concrete, master of engineering (structural engineering), university of pretoria, Afrique du Sud, 2020.

[26] S. Alsanusi, L. Bentaher, Prediction of Compressive Strength of Concrete from Early Age Test Result Using Design of Experiments (RSM), *Int. J. Civil, Environ., Struct., Constr. Archit. Eng.*, 9 (12) (2015), p. 2015.

[27] T.F. Awolusia, O.L. Okea , O.O. Akinkulore, A.O. Sojobib, Application of response surface methodology: Predicting and optimizing the properties of concrete containing

steel fibre extracted from waste tires with limestone powder as filler, *Case Studies in Construction Materials* Volume 10, June 2019, e00212.

[28] H. Basser, T. M. Shaghghi, H. Afshin, R. S. Ahari, S. S. Mirrezaei, An experimental investigation and response surface methodology-based modeling for predicting and optimizing the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete containing steel fiber and PET, *Construction and Building Materials*,. 315 (2022) 125370.

[29] NA 442. Algerian Standards, hydraulic binders – common Cements, Composition, Specification, IANOR, Algiers; 2003 [in French].

[30] ASTM C1240: Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.

[31] ASTM C 128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM, West Conshohocken, PA, 2015.

[32] ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM, West Conshohocken, PA, 2014.

[33] ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM, West Conshohocken, PA, 2015.

[34] Aitcin CP. High performances concrete. Paris: Edition Eyrolles; 2001.

[35] Deniz Bas, Ismail H Boyaci, Modelling and optimization. I. Usability of response surface methodology, *Journal of Food Engineering*., 78 (2007), 836–845.

[36] Montgomery, D.C.: Design and Analysis of Experiments, 5th edn. Wiley, New York (2001).

[37] R.C. Soares, A. Mohamed, W.S. Venturini, M. Lemaire, Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using the response surface method, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 75 (1) (2002) 1–16.

[38] O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, M. Gholhaki, Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: optimization using response surface method, *Construction and Building Materials*.,123 (2016) 59–68.

[39] V.C. Khed et al., Experimental investigation on pull-out strength of hybrid

reinforcement of fibre in rubberized cementitious composites, *Int. J. Civil Eng. Technol. (IJCIET)* 9 (7) (2018) 1612–1622.

[40] Megan Weyers, Elsabe P. Kearsley. Effect of High Plasticiser Dosage on Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC), International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures,2020.

[41] ASTM C143. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete; 2012.

[42] BS EN 12390-3. Testing harden concrete. Compressive strength of test specimens. France ; 2012 April.

[43] BS EN 12390-5, Béton-Essai de flexion, Éditions AFNOR, Paris 1981.

[44] C. Klockner, A comprehensive model of the psychology of environmental behavior—A meta-analysis, *Global Environ. Change* 23 (2013) 1028–1038.

[45] Grunewald S., Performance-based design of Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete, Ph D thesis, 2004, 165 p.

[46] E. Güneyisi, Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash. *Mater. Struct.* 2010, 43 (8), 1037e1048.

[47] T.M. Grabois, G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, R.D., Fresh and hardened state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*., 2016, 104, 284e292.

[48] R. Deeb, A. Ghanbari, B.L. Karihaloo, Development of self-compacting high and ultra-high performance concretes with and without steel fibres; *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 185–190.

[49] P. Jeganmurugan, A.S. Rameswari, N. Anuja, Experimental behaviour of fibre reinforced Self compacting concrete under cyclic loading, *Materials Today: Proceedings* 52 (2022) 1488–1493.

[50] K. Akça , M. Ipek, Effect of different fiber combinations and optimisation of an ultra-high performance concrete (UHPC) mix applicable in structural elements, *Construction and Building Materials*., 315 (2022) 125777.

[51] F. Aslani, J. Kelin, Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates

exposed to elevated temperatures, Journal of Cleaner Production 200 (2018) 1009e1025.

[52] Association Française de Génie Civil Bétons autoplaçants – "Recommandations provisoires " Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.

[53] Guendouz, M.; Boukhelkhal, Dj.; Bourdot, A.; Babachikh, O.; Hamadouche, A. The effect of ceramic wastes on physical and mechanical properties of eco-friendly fowable sand concrete Ceramic Materials. IntechOpen. 10, 2 (2020).

[54] Cheng Yuan, WensuChen, Thong M.Pham, HongHao, Bond behavior between basalt fibres reinforced polymer sheets and steel fibres reinforced concrete, Engineering Structures, Volume 176, 1 December 2018, Pages 812-824.

[55] E. Rahmani, M. Dehestani, M.H.A. Beygi, H. Allahyari, I.M. Nikbin, On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles, Construction and Building Materials,.47 (2013) 1302–1308.

[56] Nelly Majain, Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Azlan Adnan, Roslli Noor Mohamed, Bond behaviour of deformed steel bars in steel fibre high-strength self-compacting concrete, Construction and Building Materials,. 318 (2022) 125906

[57] Ingrid Lande Larsen, Rein Terje Thorstensen, The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra-high performance concrete, Construction and Building Materials,. 256 (2020) 119459.

[58] Ibrahim I.S, Che Bakar,M.B, Effects on mechanical properties of industrialised steel fibres addition to normal weight concrete, science direct, procedia engineering 14 (2011) 2616-2626.

[59] Wasim Abbass M. Iqbal Khan. Shehab Mourad. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. Construction and Building Materials,.168 (2018) 556-569.

[60] K. A. Ostrowski, K. Furtak, The influence of concrete surface preparation on the effectiveness of reinforcement using carbon fibre-reinforced polymer in high-performance, self-compacting, fibre-reinforced concrete, Composite Structures 276 (2021) 114522.

[61] D. Zhang, H. Tu, Y. Li, Y. Weng, Effect of fiber content and fiber length on the dynamic

compressive properties of strain-hardening ultra-high performance concrete, Construction and Building Materials,. 328 (2022) 127024.

