

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Thèse de Doctorat

Présentée par :

ABOUTAIR Amel

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT**

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Physique et mécanique des matériaux

TITRE

**Caractérisation Physico-mécanique et Microstructurale
des Bétons Fibrés à Matrices Ultra Haute Performance**

Devant le jury composé de :

M. KENAI Saïd	Professeur	USDB	Président
M. CHAID Rabah	Professeur	UMBB	Directeur de thèse
M. MOLEZ Laurent	HDR	INSA-Rennes	Co- Directeur de thèse
M. MOULI Mohamed	Professeur	ENPO	Examineur
M. GHERNOUTI Youcef	Professeur	UMBB	Examineur
M. AHMED CHAOUCH Ali	MC/A	USTHB	Examineur

Remerciements

Qu'il me soit permis de présenter ici mes remerciements à tout un petit monde de personnes qui ont rendu possible la présente étude, et qui ont contribué à son élaboration sous quelques formes que ce soit.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon Promoteur Monsieur **CHAID Rabah** qui, malgré les prérogatives qui sont siennes, a accepté sans réserve, de diriger cette thèse et je tiens aussi à remercier Messieurs **MOLEZ Laurent** Co- Directeur de thèse. Il s'y est grandement impliqué par ses directives, ses remarques, et suggestions, mais aussi par ses encouragements dans les moments clés de son élaboration.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ceux qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail, à savoir Messieurs **KENAI Saïd** Président de jury qui ont accepté de rapporter sur cette thèse et Messieurs **GHERNOUJI Youcef** et **MOULI Mohamed**, **AHMED CHAOUCH Ali** qui ont accepté aussi d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'étendent également à mes amis (es) et camarades, qui ont toujours été présents, toujours prêt à me renseigner et à me conseiller bien Judicieusement, à tout moment du jour et de la nuit, un grand merci à vous.

Mes remerciements vont également à Monsieur Directeur Général **DAOUDI Aziz** du CETIM de Boumerdès, sans qui, je n'aurais pas pu découvrir l'infiniment petit de la matière à savoir « le béton », je tiens aussi à remercier tous les ingénieurs du laboratoire de Béton au niveau de CITIM. Je remercie Monsieur **BELLAL Ahmed** co-directeur, qui m'a autorisée à assister aux différents essais, je finis par remercier Monsieur **SAFSAF Rachid**.

Dédicaces

Je dédie cet événement marquant de ma vie à ma mère, à mon adorable père, à celle qui est toujours présente et continue de l'être pour faire mon bonheur. Merci pour t'être sacrifiée pour que tes enfants grandissent et prospèrent. Merci de trimer sans relâche, malgré les péripéties de l'âge, de la santé, de la vie, au bien-être de tes enfants. Enfin ! Merci tout simplement d'être... ma mère.

A mon père, celui qui m'a toujours encouragée et soutenue dans mes durs moments.

A mon très cher mari : Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel m'ont permis de réussir mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle. Ainsi que la famille de mon mari.

A mes frères.

A mes sœurs.

Sommaire

LISTE DES TABLEAUX.....	4
LISTE DES FIGURES.....	5
INTRODUCTION GENERALE.....	8
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DU TRAVAIL.....	9
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	10
1. INTRODUCTION.....	10
2.COMPOSITION DES BFUP.....	11
2.1 CONSTITUANTS.....	11
2.1.1 CIMENT	11
2.1.2 GRANULAT.....	12
2.1.3 AGREGATS DE CHAMOTTE.....	12
2.1.4 VASES	13
2.1.5 FIBRES.....	14
2.1.5.1 CHOIX DU TYPE DE FIBRES.....	15
2.1.5.2 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES FIBRES.....	15
2.1.5.3 INFLUENCE DES FIBRES SUR LA MISE EN ŒUVRE DES BFUP.....	16
a) EFFETS LIES A LA TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE.....	16
b) EFFETS LIES A L'ÉCOULEMENT DU BFUHP	17
2.1.6. L'ADJUVANTS	19
2.1.7 RAPPORT EAU/LIANT.....	20
3. PRINCIPE DE FORMULATION.....	21
4. PROPRIETES DES BUHP	22
4.1 PROPRIETES RHEOLOGIQUES.....	22
4.2 RESISTANCE EN COMPRESSION ET MODULE D'ELASTICITE	23
4.3 RESISTANCE EN FLEXION	25
4.4 RESISTANCE A LA TRACTION	25
4.5 RETRAIT	27
5. TRAITEMENTS THERMIQUES.....	28
5.1 PARAMETRES A CONTROLES PENDANT LE TRAITEMENT THERMIQUE	29
5.2 INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES CARACTERISTIQUES DES BFUP	29
6.DURABILITE	30
6.1 FACTEURS DE DURABILITE DU BETON.....	31
6.2 ABSORPTION D'EAU	32
7.MICROSTRUCTURE DES PATES DE CIMENT DURCIES (PCD).....	32
7.1 MORPHOLOGIE DES PRINCIPAUX HYDRATES.....	32
7.2 LES SILICATES DE CALCIUM HYDRATES C-S-H.....	33
a. LA PORTLANDITE.....	34
b. L'ETTRINGITE.....	35
8.FABRICATION DES BFUP	35
A. MISE PAR VIBRATION.....	36
B. BETONNAGE PAR TEMPS FROID.....	37
C. CURE DU BETON.....	37
9.CONCLUSION.....	38
CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES	39
1.INTRODUCTION	39
2.MATERIAUX UTILISES	39
2.1 LE CIMENT	39

2.2 LE SABLE.....	40
2.3 L'EAU	42
2.4 L'ADJUVANT	42
2.5 LES FIBRES D'ACIER	42
2.6 CHAMOTTE	43
a. COMPOSITION CHIMIQUE	46
b. COMPOSITION MINERALOGIQUE.....	47
c. ANALYSE THERMIQUE.....	48
d. DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE	49
2.7 LA VASE.....	50
2.7.1 CALCINATION.....	52
2.7.2 CARACTERISTIQUES DES VASES APRES CALCINATION.....	53
3. COMPOSITION DES BFUP	55
3.1 SEQUENCE DE MALAXAGE	56
3.2 MISE EN PLACE DES BUHP ET MODES DE CONSERVATION.....	57
4.PROCEDURE EXPERIMENTALES	57
4.1 L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE	57
4.2 L'ESSAI D'ABSORPTION PAR IMMERSION	58
4.3 LE TRAITEMENT THERMIQUE	58
4.4 TECHNIQUES DE CARACTERISATION STRUCTURALE ET MICROSTRUCTURALE	59
a. OBSERVATIONS AU MEB	59
b. ANALYSE PAR DIFFRACTION RX.....	61
c. ANALYSE THERMO GRAVIMETRIQUE	62
5. CONCLUSION	63
CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	64
1.INTRODUCTION	64
2.BETONS A L'ETAT FRAIS	64
2.1 L'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS	64
2.2 L'AIR OCCLUS.....	66
2.3 MASSE VOLUMIQUE.....	66
3.BETONS A L'ETAT DURCI	67
3.1 MASSE VOLUMIQUE	67
3.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION	68
3.3 TRACTION PAR FLEXION	69
3.4 RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE	71
3.5 RETRAIT TOTAL	73
3.6 ABSORPTION D'EAU	74
4. INDICATEURS DE DURABILITE.....	75
4.1 ABSORPTION CAPILLAIRE	76
4.2 ABSORPTION PAR IMMERSION.....	77
5. PATE DE CIMENT DURCI	78
5.1 ANALYSE PAR DIFFRACTION DES RAYONS X.....	78
5.2 OBSERVATIONS AU MEB	80
5.3 OBSERVATIONS DES BETONS FIBRES	83
5.4 ANALYSE THERMIQUE PAR ATD ET ATG	84
6.CONCLUSION	86
CONCLUSION GENERALE	88

PERSPECTIVES.....	91
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	93
ANNEXE.....	97

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I.1 : Composition minéralogique de la chamotte [8, 9].....	13
Tableau I.2 : Composition granulométrique de la chamotte [8,9].....	13
Tableau I.3 : Caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP [13].....	15
Tableau I.4 : Formulation et séquence de malaxage [23].....	22
Tableau I.5 : Malaxage de BUHP fabrique en laboratoire [2].....	24
Tableau I.6 : Caractéristiques mécaniques des BPR [25].....	25

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment CEM II/A 42,5.....	39
Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CEM II/A 42,5.....	39
Tableau II.3 : Résistance mécaniques du ciment CEM II/A 42.....	40
Tableau II.4 : Caractéristiques physique du ciment CEM II/A 42,5.....	40
Tableau II.5 : Composition chimique du sable.....	41
Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable de dunes.....	41
Tableau II.7 : Composition chimique de l'eau.....	42
Tableau II.8 : Caractéristiques du super-plastifiant MEDAFLOW 3041 R.....	42
Tableau II.9 : Caractéristiques des fibres d'acier MEDAFAC.....	42
Tableau II.10 : Caractéristiques physiques de la chamotte.....	46
Tableau II.11 : Composition chimique pondérale de kaolin.....	46
Tableau II.12 : Récapitulatif des phases minéralogiques décelées par diffraction X.....	47
Tableau II.13 : Analyse granulométrique du kaolin.....	50
Tableau II.14 : Composition chimique de la vase du barrage de Hamiz.....	52
Tableau II.15 : Caractéristiques chimiques de la vase calcinée.....	53
Tableau II.16 : Caractéristiques physiques de la vase calcinée.....	55
Tableau II.17 : Formulations des BUHP (kg/m ³).....	55

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux

Tableau III.1 : Etalement des différents bétons.....	65
Tableau III.2 : Valeurs des teneurs en air occlus des différents bétons.....	66
Tableau III.3 : Masse volumique réelle du béton frais.....	67
Tableau III.4 : Masse volumique (kg/m ³).....	68
Tableau III. 5: Résistance à la compression des différents bétons (MPa).....	69
Tableau III.6: Résistance à la traction par flexion des différents bétons (MPa).....	70
Tableau III.7 : Résistance à la traction par fendage des différents bétons (MPa).....	72
Tableau III.8: Retraits des différents bétons.....	73
Tableau III.9 : Coefficient d'absorption d'eau des bétons (%).....	75
Tableau III.10: Absorption d'eau par capillarité pour les différents types de béton (%).....	76
Tableau III.11 : Absorption d'eau par immersion pour les différents types de bétons (%).....	77

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I.1 : Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires [10].....	14
Figure I.2 : Méthode d'introduction de béton fibre favorisant une orientation préférentielle des fibres [15].....	17
Figure I.3 : Influence de l'écoulement sur l'orientation des fibres I [16].....	17
Figure I.4 : Représentation du comportement rhéologique des BUHP [2].....	23
Figure I.5 : Comportement en compression d'un BFUP avec 2,5% de fibres métalliques comparativement à un béton classique [24].....	24
Figure I.6 : Courbe contrainte-déformation du BPR 200 en compression [25].....	25
Figure I.7 : Courbe contrainte-déformation du BPR 550 en compression [25].....	25
Figure I.8 : Comportement en traction d'un BFUP avec 3% de fibres métalliques [24].....	26
Figure I.9 : Courbe contrainte de traction-ouverture de fissure de béton, à 7% en volume de fibres métalliques [13].....	27
Figure I.10 : Influence du rapport E/L sur le retrait du BPR [28].....	28
Figure I.11 : Ordre d'apparition de différents hydrates est leur quantité relative [32].....	28
Figure I.12 : Diagramme de phase des C-S-H de Verbeck et Copleland [3].....	29
Figure I.13 : Evolution de la composition de la solution interstitielle d'après Longuet [35].....	32
Figure I.14 : Structure des C-S-H à différentes échelles d'observation, d'après Minet [39].....	33
Figure I.15 : Diversité des formes du gel C-S-H., source : Stark et al [16].....	34
Figure I.16 : Observation en microscopie électronique a balayage (a) d'une plaquette hexagonale de portlandite [42] et (b) d'ettringite aciculaire (sous forme d'aiguilles) [43].....	35

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

Figure II.1 : Diffractogramme du sable de dunes.....	40
Figure II.2 : Fibres métalliques MEDAFAC.....	43
Figure II.3 : Chamotte du kaolin DD3.....	43
Figure II.4 : Surface polie du kaolin DD3, cuit durant une heure à: (a) 1250°C, (b) 1350°C et (c) 1450°C.....	44
Figure II.5 : Micrographie d'un échantillon de grains de chamotte $100 \mu\text{m} \leq \Phi \leq 250 \mu\text{m}$	45
Figure II.6 : Micrographie de la surface d'un grain de chamotte.....	45
Figure II.7 : Spectre de DRX de la chamotte utilisée.....	45
Figure II.8 : Diffractogrammes RX des pâtes « chaux-chamotte» après 7 et 28 jours de durcissement.....	46
Figure II.9 : Diagrammes DTG des pâtes « chaux- chamotte » a 7 et 28 jours de cure	47
Figure II.10 : ATD et ATG du kaolin DD3.....	48

Figure II.11 : Spectres de DRX du kaolin DD3 pour différentes températures de traitement (C : cristobalite, M : mullite).....	48
Figure II.12 : Différents pourcentages des tailles de grains de la chamotte utilisée.....	50
Figure II.13 : Une vue du barrage de Hamiz.....	51
Figure II.14 : Situation géographique du barrage de Hamiz.....	51
FIGURE II.15 : Processus de préparation de la vase draguée.....	51
Figure II.16: Calcination de la vase.....	52
Figure II.17 : Analyses chimiques de la vase du barrage de Hamiz.....	52
Figure II.18 : Diffractogramme RX de la vase de Hamiz.....	53
Figure II.19 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase brute après 7 et 28 jours de durcissement.....	54
Figure II.20 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase calcinée à 500°C, après 7 et 28 jours de durcissement.....	54
Figure II.21 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase calcinée à 700°C, après 7 et 28 jours de durcissement.....	54
Figure II.22 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase calcinée à 800°C, après 7 et 28 jours de durcissement.....	54
Figure II.23 : Cycle d'étuvage des BUHP.....	59
Figure II.24 : Photo de la coupe d'un MEB et schéma de fonctionnement associé [46].....	60
Figure II.25 : Géométrie du diffractomètre D8 Discover-Documentation Bruker [47].....	61
Figure II.26 : Photographie du dispositif ATD-ATG couplé.....	62

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux

Figure III.1 : Evolution de l'étalement pour les différents bétons.....	65
Figure III.2 : Variation de la teneur en air occlus des différents bétons.....	66
Figure III.3 : Variation de la masse volumique réelle à l'état frais des différents bétons.....	67
Figure III.4 : Variation de la masse volumique à l'état durci des différents bétons.....	68
Figure III.5 : Résistance mécanique en compression des différents bétons.....	69
Figure III.6 : Essai de traction par flexion 3 points.....	70
Figure III.7 : Résistance en traction par flexion.....	71
Figure III.8 : Eprouvette de l'essai de traction par fendage.....	72
Figure III.9 : Evolution de la résistance en traction par fendage des différents bétons.....	72
Figure III.10 : Rétractomètre et éprouvettes 7x7x28 cm ³	73
Figure III.11 : Retrait des bétons à différentes échéances.....	74
Figure III.12 : Coefficient d'absorption d'eau des différents bétons durcis.....	75
Figure III.13 : Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des bétons à différentes échéances.....	76

Figure III.14 : Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des différents types de béton.....	77
Figure III.15 : Diffractogramme X de BUHP avec ajout de chamotte et de la vase, à 28 jours sans traitement thermique.....	79
Figure III.16 : Diffractogramme X de BUHP avec ajout de la vase et la chamotte, après un traitement thermique à 150°C.....	79
Figure III.17 : Image MEB (x250) et analyse EDS du BUHP avec ajout de la vase à 28 jours.....	80
Figure III.18 : Image MEB (x250) et analyse EDS du BUHP avec ajout de la chamotte à 28 jours.....	81
Figure III.19 : Image MEB (x250) et analyse EDS du BUHP avec ajout de la chamotte et la vase à 28 jours.....	81
Figure III.20 : Analyse EDS de la pâte des BUHP témoin : évolution des rapports élémentaires S/Ca vs Al/Ca.....	82
Figure III.21 : Béton à fibres Métalliques.....	84
Figure III.22 : Analyse thermique différentielle du BFUP avec ajout de chamotte.....	85
Figure III.23 : Analyse thermique différentielle du BFUP avec ajout de vase.....	85

INTRODUCTION GENERALE

Depuis une cinquantaine d'années, la recherche dans le domaine des matériaux de construction s'est orientée vers une nouvelle gamme de bétons : les bétons renforcés de fibres métalliques. La forte compacité de la matrice cimentaire ainsi que l'ajout de fibres métalliques permettent d'accroître fortement la résistance à la compression, à la traction ainsi que la ductilité post-fissuration. Ainsi, l'usage de ces bétons permet dans certains cas de réduire la quantité d'armatures conventionnelles et d'offrir une durabilité accrue comparativement à un mélange traditionnel grâce à un meilleur contrôle de la fissuration.

Les bétons fibrés conventionnels (BRF) ou les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) sont désormais arrivés à maturité et leur fabrication ne pose plus de problèmes majeurs. Qui plus est, les essais standards pour caractériser les propriétés à l'état frais et à l'état durci (affaissement, étalement, J-ring, module de rupture, flexion sur dalle circulaire...) ont été adaptés à ces nouveaux mélanges. Malgré ces avancées, ces bétons sont encore peu utilisés dans les structures au Algérie.

Cette tendance semble principalement due au coût moins élevé des BRF et des BFUP et à l'incapacité des concepteurs à prédire leur comportement en traction. En effet, il n'existe toujours pas d'essais normés pour caractériser le comportement en traction directe de ces matériaux cimentaires atypiques (il existe cependant des méthodes de calcul inverse pouvant être couplées à des essais de flexion). Même si un tel essai existait, la forte dépendance du comportement en traction vis-à-vis de l'orientation des fibres demeure un problème majeur pour les bétons renforcés de fibres, car il peut exister une variation importante entre l'orientation des fibres dans les spécimens de caractérisation et celle des structures fabriquées.

Cette étude, consacrée à la valorisation du sable de dune et des additions et la formulation du BFUHP de l'Algérie, se compose en trois chapitres en plus de l'introduction générale et des conclusions.

Dans le premier chapitre bibliographique, nous dressons l'état des connaissances actuel des BFUP, sur leur formulation, les propriétés à l'état frais et durci, leur durabilité. Cette synthèse doit permettre, dans un premier temps, d'orienter sur le choix des matériaux parmi les plus adaptés pour la mise au point des formulations BFUP de notre étude. Dans un second temps, l'influence des paramètres liés à la composition de ces bétons sur leurs performances mécaniques va nous aider à établir un plan d'étude vis-à-vis de la formulation. Ce chapitre montre l'intérêt de l'incorporation des additions (la vase, la chamotte) et les fibres dans la formulation des bétons. Ce chapitre nous permet de bien comprendre les réactions

engendrées par la chamotte, liée à sa structure amorphe, et d'appréhender les difficultés liées à l'ajout de ce produit.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons successivement les matériaux utilisés dans cette étude, les méthodes de formulation et de fabrication des BUHP, ainsi que la méthode expérimentale utilisée pour caractériser les BUHP aussi bien sur le plan mécanique que sur celui de leur durabilité.

Le troisième et dernier chapitre décrit les résultats mécaniques et de durabilité acquis durant cette étude, et leurs interprétations. Ils sont complétés par une analyse microscopique et minéralogique dont l'objectif est de comprendre l'origine des modifications observées. Finalement, ce mémoire s'achève sur une conclusion générale des travaux réalisés et présente les perspectives d'études de ces nouveaux bétons à très hautes performances fabriqués à partir de sable de dune et des additions et la fibre.

Problématique et objectif du travail

Le travail proposé, s'inscrit dans le cadre de la valorisation de ressources naturelle et de récupération industrielle, plus particulièrement, prospector les potentialités d'utilisation des additions qui se trouve abondant dans unité céramique de Guelma et barrage hamiz, et les fibres métalliques fournis par la société GRANITEX de oued Samar. On à pensé à élaborer un autre type des additions celle qui est conçue pour l'isolation thermique, ou bien la chamotte a porosité élevée ayant pour rôle l'isolation thermique. La particularité de ce travail réside dans le fait, qu'on ne va pas se limité a la valorisation du vase pour l'élaboration et la caractérisation du chamotte à porosité élevée mais aussi à l'évaluation de la réactivité pouzzolanique du métakaolin obtenu par traitement thermique du kaolin DD3 et de voir l'aptitude de son utilisation, comme substituant de ciment et comme addition ultra fine de haute réactivité, pour la formulation des bétons ultra hautes performances fibrés.

L'objectif de ce travail est d'examiner les effets d'utilisation des additions minérales et les fibres métalliques sur les propriétés fraiche et durci des bétons BUHP Au total cinq (5) mélanges de bétons ont été formulés ayant un rapport Eau/Fine de 0,27 constant. Le mélange témoin à inclut seulement un ciment tandis que les autres, des mélanges cimentaires de ciment et la vase et chamotte. La vase et la chamotte est utilisée comme addition minérale vue sa forte concentration de silicium. Pour que nos résultats soient exploitables, en particulier dans le domaine de la construction, notre étude a été portée sur la composition des bétons à partir d'un mélange ternaire de sable fin, des additions (la vase et la chamotte).

SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude bibliographique des bétons à performances très élevées appelés, selon les périodes ou leurs formulations, BPR (Bétons de Poudres Réactives), BUHP (Bétons à Ultra Hautes Performances) ou BFUHP (Bétons Fibrés Ultra Performants). Pour notre part, nous retiendrons dans la suite de ce document soit l'appellation BUHP, soit l'appellation BFUHP.

Les BUHP présentent des caractéristiques hors du commun et même hors normes. De par la dimension des granulats, ils s'apparentent à la famille des bétons de sable (composés de sable, optimisation granulaire de ciment, d'eau et d'adjuvants) mais des ajouts spécifiques sont aussi exigés (ultrafines, fibres) ou peuvent être envisagés (gravillons).

La mise au point et la réalisation d'un BUHP sont devenues de ce fait des opérations plus complexes que celles nécessaires pour un béton ordinaire traditionnel, voire pour un béton à hautes performances. En effet, il s'agit de combiner un nombre plus élevé de matériaux, de tailles très différentes, en limitant au maximum la teneur en eau du mélange. Cette opération nécessite de forts dosages en adjuvants ce qui peut s'accompagner de problèmes de compatibilité entre matériaux (par exemple entre le ciment, l'ultra fine et les adjuvants).

Après une brève présentation des généralités, nous commencerons par détailler les spécifications concernant la mise au point de formulations des BFUP, ceci afin d'identifier les préconisations concernant la sélection des matières premières et les principes de formulation permettant d'atteindre des performances mécaniques élevées. Cette partie permettra notamment de mettre en évidence les particularités de ces bétons qui constituent, à l'heure actuelle, des freins à son usage.

Dans un second temps, nous présenterons les propriétés des BFUP. Une synthèse sur le comportement à l'état frais sera détaillée afin d'identifier les paramètres à prendre en compte lors de la mise en œuvre de ces matériaux. Nous poursuivrons par la présentation des propriétés mécaniques avec l'identification des facteurs influents permettant d'obtenir des performances élevées.

Nous présenterons aussi les comportements des matériaux aux états frais et durci (rhéologie, comportements mécaniques, durabilité) et leurs utilisations dans l'industrie. Enfin, les recommandations préconisées en vue de l'obtention des performances mécaniques élevées de ces bétons seront données.

Les principaux résultats de ces études doivent nous servir ensuite pour développer ce type de béton en utilisant le sable de dune du sud de l'Algérie et aussi des additions locaux, pour le caractériser en laboratoire et étudier son éventuelle valorisation en Génie Civil.

2. COMPOSITION DES BFUP

Cette partie décrit les spécifications concernant le choix des matériaux ainsi que les méthodes de formulation des BFUP. Les précautions en termes de fabrication et de mise en œuvre sont également détaillées. Leur composition est optimisée : E/C très faible et squelette granulaire très dense. Par définition, les BFUP sont des matériaux à matrice cimentaire de résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 150 MPa et pouvant aller jusqu'à 250 MPa [1].

2.1 Constituants

Les différents constituants (composants granulaires et adjuvants) qui forment généralement les BUHP sont :

- le ciment,
- le sable fin ($0,063 \text{ mm} < \text{diamètre max} < 2 \text{ mm}$),
- les fines (la vase, la chamotte, fumé de silice ...etc.)
- les fibres métalliques.
- le superplastifiant haut réducteur d'eau,
- l'eau.

2.1.1 *Ciment*

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton BUHP est conforme à la norme NA 442. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts (CEM II à CEM V). La rhéologie des BUHP étant fortement liée à la réactivité du ciment utilisé, il apparaît que l'emploi de ciment à faible teneur en C_3A et à faible surface spécifique permet d'augmenter l'ouvrabilité des BUHP. Selon Bonneau [2], un ciment CEM I 52,5 PME conduit à de très bonnes performances rhéologiques et mécaniques. En effet, ce ciment se caractérise par une faible teneur en C_3A et un pourcentage en C_3S qui favorise le développement de haute résistance mécanique.

Cependant, certains ciments CEM I 42,5 peuvent également conduire à des résistances élevées.

2.1.2 Granulats

Le granulats préférentiellement utilisé pour les BFUP est en général un sable dit fin [3, 4]. Il est défini comme un granulats naturel dont le diamètre du plus gros granulats est limité à 4 mm. Plusieurs auteurs [3, 4] préconisent un sable fin de forme arrondie présentant une forte teneur en silice (> 98 %), et un faible taux d'absorption d'eau. Cette forme de grains tend à également réduire les frottements entre les grains. Dans la formulation des BUHP, le sable est choisi pour sa composition minérale (teneur en SiO_2 > 98 %), la taille moyenne de ses grains (généralement entre 400 et 600 μm) et leur forme (forme arrondie) [3]. Ce doit être un matériau de grande dureté qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâtes/granulats. La forme des grains arrondie présente une absorption d'eau faible et favorise la rhéologie du béton [4]. Cette réduction des frottements accompagnée d'un faible taux d'absorption d'eau favorise l'ouvrabilité. Malgré ces préconisations, [5, 6 et 7] ont employé des granulats de dimensions variant de 2 à 16 mm dans la confection de leurs BFUP.

Conformément aux normes NF EN 12620 [AFNOR NF EN 12620, 2003] et NF XP P18-545 [AFNOR XP P18-545, 2004], le sable est défini comme étant un granulats naturel 0/D avec D (diamètre du plus gros granulats) limité à 4 mm. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire (ou de ballastière), soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Dans la pratique actuelle, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sable dont 12 % de fines sont inférieurs à 0,08 mm tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique [AFNOR NF EN 12620, 2003].

Ainsi, le sable de plage (lavé pour éviter les ions chlore) et le sable de dune, de nature siliceuse et dont la taille des grains est comprise entre 0,063 et 2 mm, semblent parfaitement adaptés à la fabrication des BUHP.

2.1.3 Agrégats de Chamotte

L'incorporation de la chamotte dans le mélange de matières premières destiné à la fabrication de BUHP a un double objectif :

- Un objectif d'ordre économique qui consiste à recycler les produits usagés (dégradés).

- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables [8].

La chamotte est constituée par les déchets de briques silico-alumineuses broyées. Sa composition minéralogique (tableau I.1) renferme essentiellement de la mullite, de la cristobalite et une phase vitreuse.

Tableau I.1 : Composition minéralogique de la chamotte [8, 9].

Phase	Proportion (%)
Mullite $3Al_2O_3, 2SiO_2$	55
Quartz SiO_2	10
Phase amorphe	32
Rutile TiO_2	3

Tableau I.2 : Composition granulométrique de la chamotte [8, 9].

Dimensions des grains	Proportion (%)
1,25 à 3 mm	26,06
0,315 à 1,25 mm	29,91
< 0,315 mm	44,03

2.1.4 La Vase

Les sédiments, plus communément appelés vases, sont définis comme « un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport ». La sédimentation désigne l'ensemble des processus par lesquels ces particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer.

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de vase.

IL y a quatre éléments principaux constitues les vases :

- La fraction minérale (quartz, feldspaths ou carbonates).
- La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite).
- la fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques).
- Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20 μm , il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les « Vases » correspondent à la fraction inférieure à 63 μm . [10] Le schéma ci-dessous retrace les grands ensembles de la composition des sédiments portuaires vis-à-vis notamment de leur siccité ou de leur granulométrie : voir (figure I.1) [10].

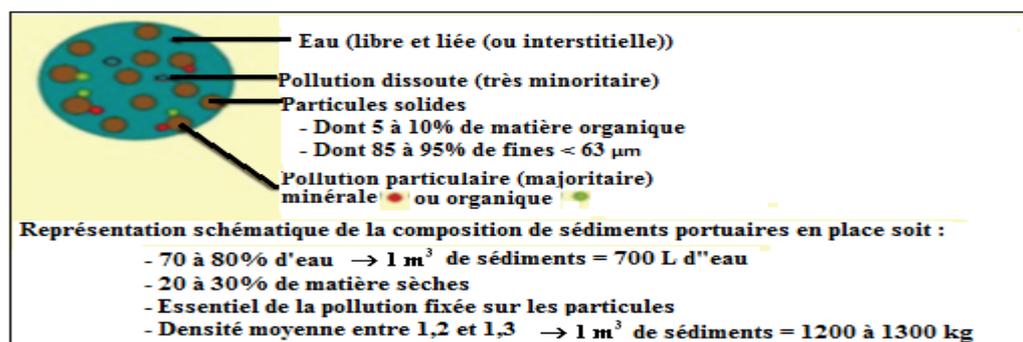


Figure I.1 : Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires [10].

2.1.5 Fibres

Rossi et al [11] ont montré le rôle des fibres dans les BUHP : les fibres sont un obstacle à la formation et la propagation des fissures qui causent l'endommagement de la structure. Les fibres sont incorporées au béton en vue d'obtenir un comportement ductile en traction et de s'affranchir si possible de l'emploi d'armatures passives.

Lors d'un traitement thermique pour améliorer les propriétés à haute température, les BUHP renfermant un certain pourcentage de fibres atteignent des contraintes de compression maximales car les fibres agissent sur la microfissuration induite par les forts gradients thermiques et les changements minéralogiques [AFGC, 2002].

Le pourcentage incorporable des fibres dans les BUHP est limité par des critères de maniabilité [12].

2.1.5.1 *Choix du type de fibres*

De nombreuses campagnes expérimentales sur les bétons fibrés ont démontré que l'efficacité et le choix des fibres dans la matrice peuvent être expliqués par leur nature, leur longueur, leur diamètre, leur forme et leur dosage.

Le choix des fibres est aussi conditionné par un module d'élasticité très élevé, afin que les fibres soient arrachées et non cassées.

Le Tableau I.3 présente les caractéristiques de certaines fibres appropriées aux BFUP et disponibles sur le marché.

Tableau I.3 : Caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP [13].

Propriétés	Acier doux	Acier HR	Carbone	Kevlar
Masse volumique (kg/m ³)	7850	7850	1780	1500
Résistance à la traction (MPa)	600	1200-3000	3600	2900
Module élastique (GPa)	200	200	228	130
Allongement à la rupture (%)	< 3,0	< 3,0	< 1,0	2,5
Fabrication	Laine d'acier	Tréfilées	Mono filament	Mono filament

2.1.5.2 *Caractéristiques géométriques des fibres*

Les fibres les plus répandues ont une forme cylindrique et droite, et sont alors caractérisées par leur longueur L et leur diamètre d.

Dans les BFUP, on utilise généralement des fibres de longueur entre 3 et 15 mm avec un diamètre qui varie entre 30 et 250 µm. Pour un volume donné, le nombre de fibres dépend du volume unitaire des fibres.

Les caractéristiques et le volume des fibres utilisées influent sur les propriétés mécaniques des BFUP lors d'un chargement en traction ou en flexion. Les fibres longues diminuent fortement la maniabilité des BFUP et sont à l'origine d'une finition de mauvaise qualité due à la propension des fibres à s'aligner sur les arêtes. A contrario, l'utilisation de fibres très courtes permet d'obtenir une bonne ouvrabilité et facilite le malaxage ainsi que la finition des matériaux fortement dosés en particules fines et ultrafines [14].

2.1.5.3 Influence des fibres sur la mise en œuvre des BFUP

Lorsqu'on met en œuvre un BUHP dont la formulation a été optimisée, il est important de tenir compte de certaines spécificités liées à la technologie de mise en œuvre et au type de structure.

Ces spécificités peuvent se décliner de la manière suivante :

- ✓ l'orientation préférentielle des fibres ;
- ✓ les effets de voûte ou d'écran ;
- ✓ les effets de cheminée ;
- ✓ la ségrégation des fibres ;
- ✓ l'appauvrissement en fibres ;
- ✓ la relation entre la forme de la fibre et la maniabilité du BFUP.

a) Effets liés à la technique de mise en œuvre

Les BFUHP sont mis en œuvre par coulage ou par projection.

Dans le cas du béton coulé, quatre situations sont à considérer :

- le BFUHP doit s'écouler pour remplir le coffrage : l'écoulement dans le coffrage produit une orientation préférentielle des fibres ;
- le BFUHP ne doit pas s'écouler, ou très peu : l'orientation des fibres dépend de la technique de coulage adoptée ;
- si le BFUHP est mis en place à l'aide d'une pompe ou d'une benne à manchon, les fibres se trouvent orientées dans le tuyau de la pompe et dans le manchon, parallèlement aux parois ;
- si le BFUHP est mis en place à l'aide d'une benne sans manchon, les fibres subissent peu d'orientation préférentielle, et l'on observe une orientation relativement isotrope des fibres au sein de la structure, à l'exception du voisinage des parois du moule.

Pour le béton projeté, les fibres sont préférentiellement orientées parallèlement aux parois de la lance de projection à la sortie de celle-ci.

L'importance de cette orientation préférentielle dépend du rapport longueur de la fibre sur l'épaisseur de la couche de BFUHP projeté. Ainsi, plus ce rapport est faible, plus l'orientation préférentielle est importante.

Il faut accorder une attention toute particulière à la représentativité des BFUHP mis en œuvre en laboratoire pour confectionner des éprouvettes de petites dimensions. Du fait de la manière dont le BFUHP est prélevé par l'outil servant à remplir le moule, de la forme de celui-ci, de la manière dont l'outil introduit le BFUHP dans le moule, de la petitesse de ce dernier qui exclut un écoulement important du BFUHP, les fibres sont orientées préférentiellement perpendiculairement à la surface du moule par où le BFUHP est introduit. Cette orientation préférentielle constitue souvent un élément essentiel du manque de représentativité du comportement mécanique d'un BFUHP de laboratoire par rapport à celui utilisé pour une application industrielle donnée.

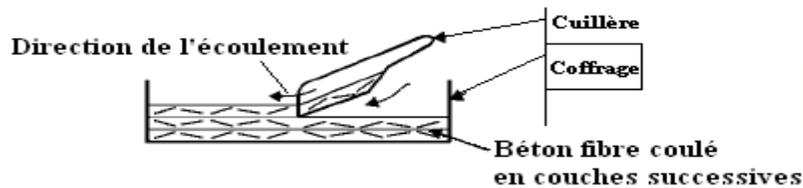


Figure I.2 : Méthode d'introduction de béton fibré favorisant une orientation préférentielle des fibres [15].

b) Effets liés à l'écoulement du BFUHP

Dans le cas où le BFUHP peut s'écouler à l'intérieur du coffrage soit par gravité, soit sous l'effet d'une vibration, les fibres ont tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement du fluide visqueux que constitue le béton. Cette tendance augmente lorsque le rapport distance d'écoulement / longueur de la fibre augmente [14].

Les effets de paroi sont une conséquence de cette orientation des fibres. En effet, lorsqu'un BFUHP s'écoule le long d'une paroi, les lignes de courant sont parallèles à la surface de la paroi, donc les fibres s'orientent également parallèlement à cette surface.

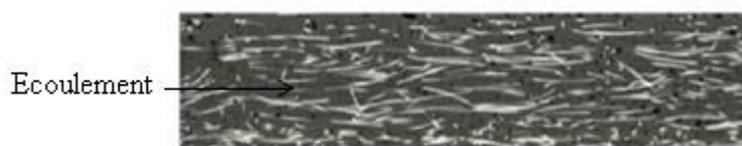


Figure I.3 : Influence de l'écoulement sur l'orientation des fibres [16].

- Effets de voûte ou d'écran

Ces effets de voûte [14,17 et 18] apparaissent lorsqu'un obstacle s'oppose au déplacement des fibres : des fibres peuvent s'accumuler et former un paquet qui, en empêchant le déplacement des autres fibres mais également des gros granulats du BFUHP, induisent de la

ségrégation. On rencontre ce problème lorsqu'un BFUHP est coulé dans une structure comportant des armatures traditionnelles avec des espacements entre armatures plus petits ou très peu supérieurs à la longueur des fibres. Il peut également intervenir lorsqu'un BFUHP est coulé entre deux parois d'un moule ou d'un coffrage distantes d'une longueur voisine ou inférieure à celle des fibres.

- *Effets de cheminée*

Ce phénomène apparaît lorsqu'un BFUHP assez visqueux, et contenant un pourcentage de fibres important (supérieur à 50 kg/m^3), est vibré à l'aide d'une aiguille vibrante [1, 14].

La pénétration de l'aiguille dans le BFUHP provoque un écoulement local de celui-ci le long de l'aiguille, et une orientation des fibres parallèlement à l'axe longitudinal de celle-ci. Dans le cas d'un pourcentage élevé de fibres, leur enchevêtrement crée autour de l'aiguille une « enveloppe » rigide qui empêche la matrice visqueuse de combler de manière satisfaisante la cheminée laissée par l'aiguille.

Il est par conséquent d'autant plus important d'éviter de vibrer à l'aiguille vibrante un BFUHP, que celui est visqueux et contient un pourcentage élevé de fibres.

- *Ségrégation des fibres*

Ce phénomène de ségrégation [14, 19] apparaît lorsqu'on utilise un BFUHP très fluide pour élément structurel de hauteur importante (colonne ou poutre de grande hauteur). Il a la même origine que celle relative à la ségrégation des gros granulats d'un béton, c'est-à-dire la pesanteur.

Il est d'autant plus important que le poids unitaire de la fibre augmente et que sa surface spécifique diminue. En effet, plus la surface spécifique de la fibre augmente, plus les frottements exercés sur elle par la matrice sont importants et en ralentissent la chute.

- *Appauvrissement en fibres*

Ce problème intervient principalement dans le cas des bétons projetés [14]. En effet, lorsque la fibre est projetée à l'aide d'une lance de projection, elle acquiert une certaine énergie cinétique en arrivant sur la paroi que l'on désire renforcer. Cette paroi étant habituellement peu déformable, les fibres vont avoir tendance à rebondir sur cette paroi

(ce rebond est plus important dans le cas de la technique de projection par voie sèche que dans celle par voie humide).

En voie sèche, l'importance du rebond dépend de nombreux paramètres (poids unitaire de la fibre, vitesse de projection, distance et angle de la lance de projection par rapport à la paroi, rapport longueur de la fibre / taille du plus gros granulat...).

L'appauvrissement en fibres des BFUHP projetés constitue donc un aspect très important vis-à-vis de l'utilisation de ces matériaux [14].

2.1.6 Les Adjuvants

Les adjuvants est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci [AFNOR NF EN 934-2/A2, 2006]. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires.

Les grains de ciment au contact de l'eau ont tendance à s'agglomérer (floculation). Ce phénomène, lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains, a pour conséquences :

- de piéger de l'eau qui n'est plus disponible pour l'ouvrabilité ;
- de limiter l'hydratation au cœur des floes.

Le problème de la formulation d'un béton se pose en termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité.

Bonneau [2] a pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (V) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V = v_0 (d/D)^{0,2}$$

Où :

v_0 : constante empirique

d : dimension du tamis retenant 90% du granulat

D : dimension du tamis retenant 10% du granulat

Cette meilleure dispersion se traduit par une diminution de la quantité d'eau de gâchage pour un affaissement donné.

Les effets des superplastifiants ne se développent pas que sur les composés principaux des ciments, mais ils agissent aussi sur les sulfates : c'est leur action sur la solubilité des sulfates qui conditionne les propriétés dispersantes. De plus, à dosages élevés, ils peuvent entraîner des retards de prise importants ainsi que des entraînements d'air (effets secondaires).

Un superplastifiant permet de réduire la quantité d'eau et donc d'augmenter la résistance mécanique du béton tout en contrôlant sa rhéologie. Il devient possible de rapprocher considérablement les grains de ciment lorsqu'ils s'hydratent durant le mélange. Cet effet permet ainsi de confectionner des bétons à matrice cimentaire très dense et très imperméable qui présentent une résistance à la pénétration des agents agressifs sans commune mesure avec celle des bétons ordinaires [2].

La grande majorité des superplastifiants actuellement utilisés dans l'industrie du béton sont des polynaphtalènes sulfonates (PNS) ou des polymélamines sulfonates (PMS) dont le mode d'action est essentiellement la répulsion électrostatique. Plus récemment, deux nouvelles familles de produits ont été mises au point : les polyacrylates (PA) et les polycarboxylates (PC).

Ces superplastifiants hauts réducteurs d'eau à effet fluidifiant prolongé sont des polymères acryliques (chargés négativement) sur lesquels sont fixés des polymères non chargés (polyoxydes d'éthylène) ou présentant des groupements terminaux anioniques. Spécialement conçu pour le béton de bâtiment et de génie civil, ils permettent la confection de bétons à hautes performances. Leur action dispersante, liée aux groupements polyoxydes d'éthylène très encombrants, est principalement due à des forces de répulsion stériques.

2.1.7 Rapport eau/liant

Pour atteindre des résistances de l'ordre de 150 MPa, il est nécessaire de réduire le rapport Eau/Liant (E/L) à des valeurs inférieures à 0,2 [20]. Pour de telles valeurs, la quantité d'eau n'est pas suffisante pour hydrater la totalité du ciment, ce qui implique qu'une part importante du ciment demeure non hydratée et joue le rôle d'un filler, mais demeure suffisante pour procurer une cohésion et structurer le matériau. Cependant, à rapport E/C égal à 0,27, les valeurs de résistance varient de 130 MPa à 192 MPa [6], et des variations semblables peuvent être observées pour des valeurs de rapport E/C de 0,19 et de 0,21. Ceci signifie que le rapport E/C est un paramètre important, mais pas le seul à impacter la résistance en compression [21].

3. PRINCIPE DE FORMULATION

Nous avons établi dans la partie précédente que la formulation de BFUP fait appel à l'utilisation de matériaux aux caractéristiques bien spécifiques. La matrice cimentaire des BFUP est composée d'une grande quantité de ciment, de superplastifiant, de vase ou éventuellement d'une autre ultrafine telle que la chamotte, et de sable fin dont la taille du diamètre maximal est comprise entre 0,5 et 4 mm. Le quartz broyé peut être ajouté dans le cas de traitement thermique. Un dosage important en fibres métalliques, supérieur ou égal à 2% volumique, est généralement incorporé dans la matrice afin d'améliorer la résistance en traction et la ductilité du matériau.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode générale de formulation des BFUP, mais plutôt des principes. Ces principes proposés par Caquot A [22], et De Larrard [4] se basent sur différents critères :

- réduction du rapport Eau/Liant (E/L) ;
- amélioration de l'homogénéité du mélange en réduisant la taille des grains inertes (granulats) ;
- augmentation de la teneur en fines (ciment et additions) ;
- amélioration et optimisation de la compacité du squelette granulaire ;
- ajout de fibres afin d'améliorer la ductilité du béton ($\geq 2\%$ volumique) ;
- amélioration éventuelle de la microstructure par traitement thermique.

La démarche adoptée vise à réduire la porosité du matériau et à augmenter la compacité du squelette granulaire. Pour cela, le rapport E/L est réduit à des valeurs inférieures à 0,2 grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines.

L'optimisation du squelette granulaire s'effectue à deux niveaux. Le premier niveau consiste à réduire la taille des granulats pour obtenir un mélange plus homogène et limiter la porosité intergranulaire. Le deuxième consiste à améliorer la compacité du mélange en augmentant la teneur en liant, qui comble les vides entre les grains. L'application d'un traitement thermique est possible pour accroître davantage les performances mécaniques. Enfin, l'ajout de fibres permet d'améliorer la ductilité du béton.

Une étude assez complète sur les BUHP a été réalisée par Rougeau et al [23]. Les matières premières utilisées pour réaliser les différentes formules de BUHP étaient :

- deux ciments : CPA CEM 1 52,5 PM ES CP2 et CPA CEM 1 52,5 R,
- du quartz broyé (diamètre moyen de 9 μm),
- un sable siliceux (80% des grains compris entre 200 et 500 μm),
- des fibres métalliques (longueur de 1 à 13 mm, diamètre de 50 à 160 μm),
- plusieurs ultrafines : fumée de silice, métakaolins, silicates d'alumine, cendres volantes,
- différents adjuvants : polynaphtalènes, polymélamines, polyacrylates, éther polycarboxylique (le choix était basé sur des critères d'efficacité et de coût).

La plupart des gâchées ont été réalisées avec un malaxeur à mortier de 15 litres. Il est indiqué que l'introduction de superplastifiant en deux temps augmentait son efficacité et permettait ainsi de réduire la quantité à utiliser pour une fluidité donnée. Le premier ajout d'eau et de superplastifiant permet de mouiller la surface des constituants secs (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Malaxage de BUHP fabriqué en laboratoire [2].

3 min	Homogénéisation des matériaux secs.
2 min	Ajout de l'eau et de la moitié du superplastifiant
5 min	Ajout de l'autre moitié du superplastifiant Malaxage à grande vitesse.

4. PROPRIETES DES BUHP

4.1 Propriétés rhéologiques

On s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps. Le béton peut donc être caractérisé entièrement par deux paramètres soit la viscosité plastique et le seuil de cisaillement selon Bonneau [2] (Figure I.4).

En pratique, on utilise un rhéomètre, appareil qui sert à étudier les propriétés rhéologiques des substances, pour évaluer le comportement rhéologique des BUHP.

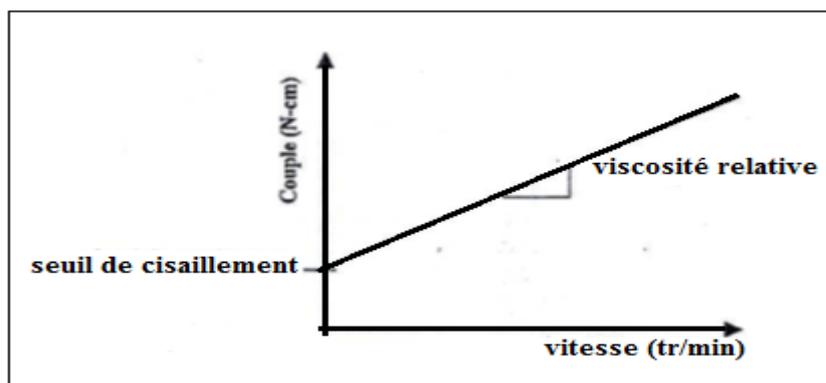


Figure I.4 : Représentation du comportement rhéologique des BUHP [2].

Bonneau [2] a montré que les BUHP, qui sont visqueux et très collants, sont des matériaux thixotropes, dont la viscosité apparente est fonction décroissante de la vitesse de déformation, et que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin du malaxage.

La composition du mélange, le temps de malaxage, le dosage optimal en superplastifiant et la température affectent le comportement rhéologique des BUHP. Bonneau [2] a aussi montré que les constituants utilisés adsorbent une quantité croissante de superplastifiant selon l'ordre suivant : fumée de silice, quartz broyé, ciment. L'adsorption dépend fortement de la surface spécifique.

La séquence de malaxage proposé par Bonneau [2] pour un BUHP mélangé dans un malaxeur classique à faible cisaillement est présentée dans le Tableau I.5. Le temps de malaxage peut varier selon le rapport E/C, le dosage en ciment et en ultrafines et l'efficacité du superplastifiant utilisé.

4.2 Résistance en compression et module d'élasticité

La résistance en compression représente une qualité de référence pour les BFUP tant elle est considérablement augmentée par rapport au béton ordinaire. Le comportement en compression des BFUP est caractérisé par leurs résistances en compression et leurs modules d'élasticité. La résistance caractéristique à la compression à 28 jours est comprise entre 150 et 250 MPa. Le module d'élasticité varie selon les formulations entre 40 et 80 GPa.

La figure I.5 montre des courbes de chargement typiques du comportement mécanique à la compression du BFUP et d'un béton ordinaire. Lors d'un essai de compression, le BFUP se comporte pratiquement de façon linéaire jusqu'à la contrainte maximale. Les fibres

métalliques permettent ensuite d'éviter une rupture fragile. De même les fissures présentant une ouverture plus fine (figure I.5).

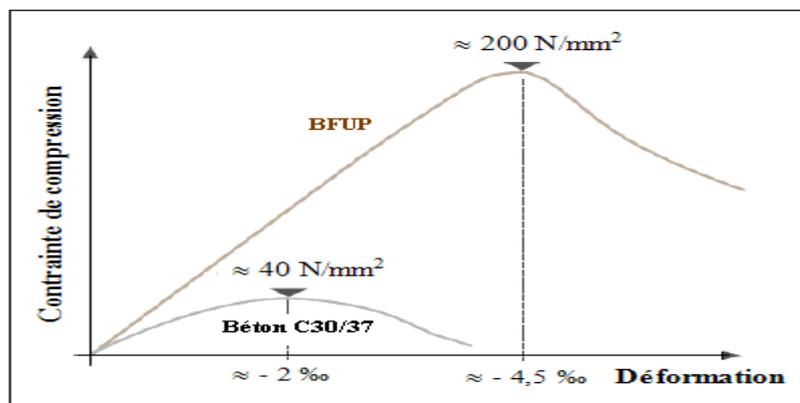


Figure I.5 : Comportement en compression d'un BFUP avec 2,5% de fibres métalliques comparativement à un béton classique [24].

Dugat et al [25] ont pu fabriquer en laboratoire des BPR 200 et des BPR 550 dont les caractéristiques mécaniques mesurées sur des éprouvettes cylindriques (respectivement 90 x 180 mm et 70 x 140 mm) sont présentées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Caractéristiques mécaniques des BPR [25].

CARACTERISTIQUES	BPR 200	BPR 550
Traitement thermique	90 °C	Pressage 60 MPa (90°C + 250°C)
- Résistance à la compression (MPa)	190-200	420-520
- Module d'élasticité E (GPa)	60-66	60-74
- Coefficient de Poisson ν	0,22-0,24	0,28
- Limite d'élasticité linéaire (% de la résistance ultime)	60%	85%

Les figure I.6 et figure I.7 présentent respectivement les comportements mécaniques en compression des BPR200 et BPR550.

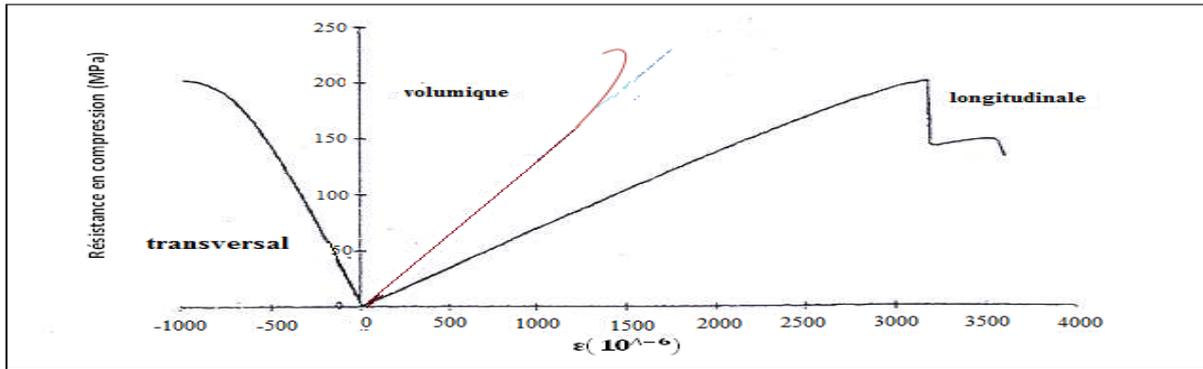


Figure I.6 : Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression [25].

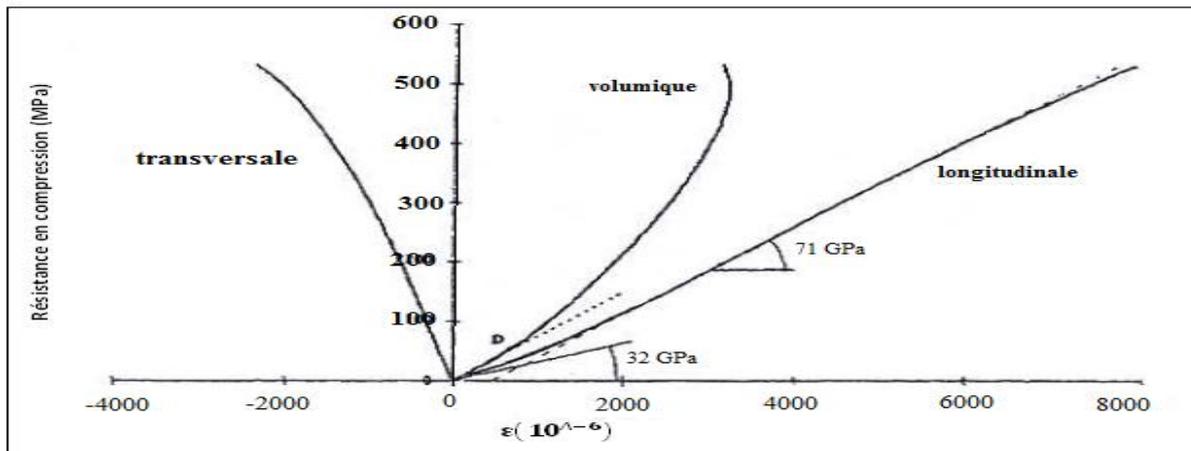


Figure I.7 : Courbe contrainte-déformation du BPR550 en compression [25].

4.3 Résistance en flexion

Dans le cas des BUHP non fibrés, la résistance aux efforts de flexion ne dépasse pas les 20 MPa et présente une rupture fragile. De ce fait, leur comportement mécanique est linéaire élastique jusqu'à la rupture.

L'addition de fibres entraîne une augmentation significative des résistances et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré, pour les BUHP fibrés sans pressage avec une résistance à la flexion de l'ordre de 60 MPa. Pour une même teneur en fibres et un même type de fibres, Richard et al [3] montre que le BPR200 présente une résistance à la flexion de 30 à 50 MPa tandis que le BPR550 avec pressage atteint des résistances de 45 MPa à 140 MPa.

4.4 Résistance à la traction

Le comportement d'un BFUP lors d'un essai de traction présente trois domaines distincts: élastique, écrouissant (fonction du type, du dosage et de la géométrie des fibres) et adoucissant (figure I.8). La résistance à la traction d'un BFUP dépasse nettement celle d'un

béton usuel ou à haute résistance et peut être considérée dans le calcul de résistance en section. Une fois la résistance en traction de la matrice cimentaire atteinte, le fibrage métallique assure une microfissuration répartie et pratiquement invisible. Il confère ainsi au BFUP une capacité de déformation jusqu'à environ 2‰ d'allongement. Une fois la résistance maximale en traction du BFUP atteinte, les déformations se concentrent dans une seule fissure qui s'ouvre progressivement avec un arrachement des fibres. La contrainte de traction diminue graduellement avec l'ouverture de la fissure pour tomber à zéro à l'arrachement total des fibres. A ce stade, l'ouverture maximale de la fissure correspond environ à une demi-longueur de fibre ($w_{\max} \approx lf/2$).

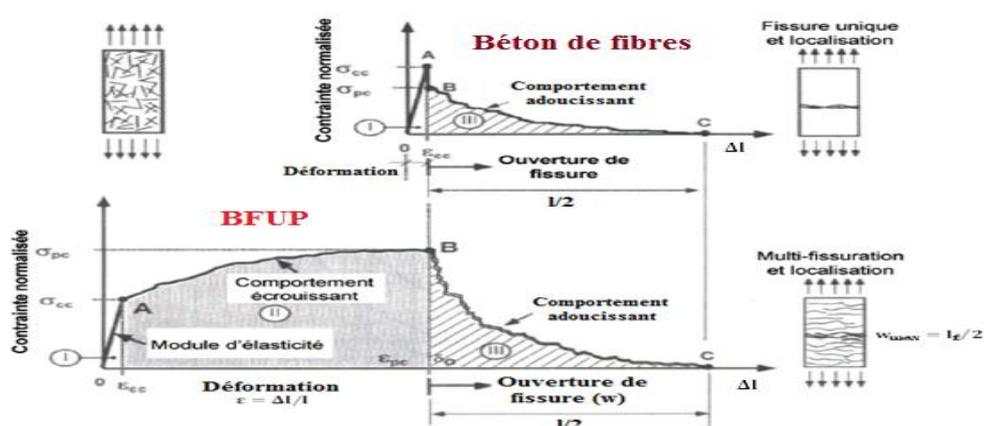


Figure I.8 : Comportement en traction d'un BFUP avec 3% de fibres métalliques [24].

Peu de données sur la résistance à la traction directe sont disponibles dans la littérature (on caractérise surtout la résistance à la traction par l'essai qui a tendance à surestimer la résistance de flexion : résistance à la traction par flexion).

Behloul [26] présente des résultats sur la traction directe du BPR200, renforcé avec 2% de fibres métallique de 13 mm de longueur, compris entre 8 et 10 MPa.

Rossi et al [13] ont mené une campagne d'essais sur la traction directe d'un matériau renfermant 7% en volume de fibres métalliques dont 5% de fibres 5 mm et 2% de fibres 25 mm sur des éprouvettes cylindriques (74 -150 mm) entaillées sur une profondeur de 15 mm. Les résultats des contraintes de traction-ouverture de fissure sont présentés sur la (Figure I.9).

L'augmentation du volume de fibres et la combinaison de fibres courtes et de fibres longues a permis d'obtenir un comportement ductile jusqu'à une ouverture de fissure de 400 μm selon [13].

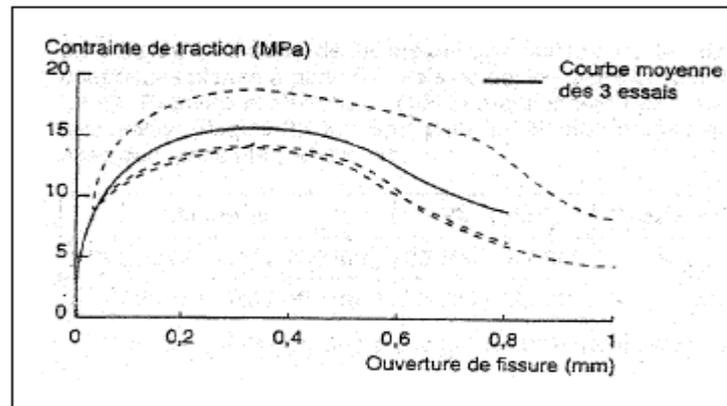


Figure I.9 : Courbe contrainte de traction - ouverture de fissure de béton, à 7 % en volume de fibres métalliques [13].

4.5 Retrait

Dans les BFUP, le retrait endogène de la matrice cimentaire est important comme pour les BHP, suite au faible rapport eau/ciment qui conduit à un diamètre des pores réduit. Ce retrait endogène n'est pas gêné par le squelette granulaire, et la formation de microfissures est extrêmement faible.

Neville [27], indique contrairement aux BHP un retrait endogène de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un BUHP de rapport E/C égal à 0,17. Loukili et al [28] ont trouvé un retrait endogène d'une valeur maximale égale à 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 160 jours, dont 45 % atteint en 1 jour et 95 % en 10 jours, sur des BUHP fibrés. Ils indiquent que les BUHP contenant plus de pâte de ciment, ils présentent un retrait endogène plus élevé que celui des bétons ordinaires. En revanche, malgré l'absence de résultats expérimentaux à ce jour, les BUHP traités thermiquement à très haute température et en étuve pourraient développer un retrait quasiment nul.

Loukili et al [26], a montré que le retrait endogène devient de nouveau faible pour les (BPR) avec de très faibles rapports E/L (0,15 à 0,09), présentant ainsi une relation inverse entre le retrait endogène et le rapport E/C et qui diffère de la tendance habituelle et couramment observée, voir (Figure I.10).

L'action des fibres sur le retrait endogène a été aussi mise en évidence. Loukili et al, Cheyrezy et Behloul [28, 29] ont montré que le retrait endogène diminue de 10 à 20 % en présence de fibres.

L'efficacité des fibres dans l'amélioration du comportement des matériaux cimentaires en conditions de déformations empêchées a été également montrée par Banthia , Paillère et coll [30, 31].

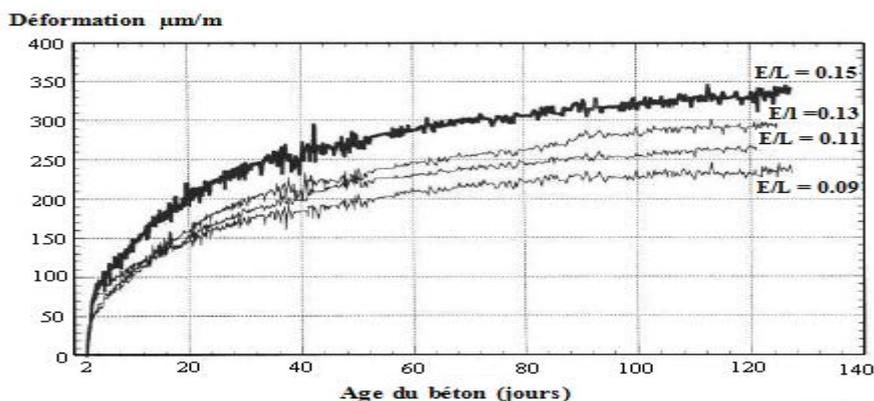


Figure I.10 : Influence du rapport E/L sur le retrait du BPR [28].

Le retrait des matrices cimentaires est un processus relativement complexe. Parmi les cinq types de retrait, on s'intéresse dans cette étude aux retraits endogènes et le retrait de dessiccation des Béton à Ultra Haute Performance.

5. TRAITEMENTS THERMIQUES

C'est une méthode qui permet d'accélérer le processus de maturation et augmenter la résistance du béton dont la valeur finale est pratiquement atteinte dès la fin du traitement.

Comme indiqué précédemment certains BFUP font objet de traitement thermique (TT) qui consiste à porter les éléments à une température relativement élevée (de l'ordre de 90°C) plusieurs heures après la prise du béton.

Ces traitements doivent intervenir après la fin de prise de manière à éviter tout risque de formation d'ettringite différée (DEF). Leur mise en œuvre nécessite ainsi une bonne connaissance et un dispositif de contrôle du temps de prise [AFGC, janvier 2002], parce que le taux d'application de l'ettringite différée augmente d'une manière considérable juste après, comme le montre la figure I.11.

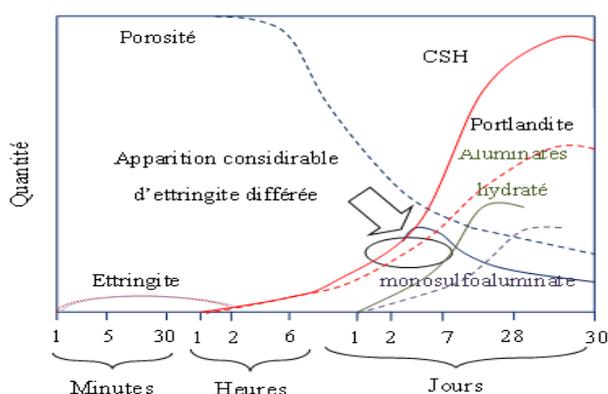


Figure I.11 : Ordre d'apparition de différents hydrates est leur quantité relative [32].

5.1 Paramètres à contrôlés pendant le traitement thermique

Un traitement thermique efficace nécessite le contrôle des paramètres suivants :

- La vitesse de montée de la température selon l'épaisseur de la pièce fabriquée, pour assurer un écart de température admissible entre le cœur et la surface de la pièce.
- Le degré de saturation de l'air aspiré et leur température (pour éviter la dessiccation).
- Duré de traitement.
- La vitesse de diminution de la température après la fin de traitement.

5.2 Influence du traitement thermique sur les caractéristiques des BFUP

Le traitement thermique à une influence directe sur les caractéristiques de BFUP, cela permet :

- D'obtenir des résistances mécaniques élevées très rapidement.
- D'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées.
- D'amélioration la microstructure.
- D'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité.
- De diminution les effets différés du retraits et du fluage.
- D'éviter tout risque de fissuration par retrait.

Le comportement mécanique particulier des BUHP et des BUHP traités thermiquement peut s'expliquer à partir de la nature cristalline des phases des hydrates.

Le diagramme de Verbeck et Copeland [3] cité dans des phases des produits d'hydratation des silicates montre les différentes phases de C-S-H formées sous un traitement thermique en fonction du rapport molaire CaO/SiO₂ noté C/S (Figure I.12).

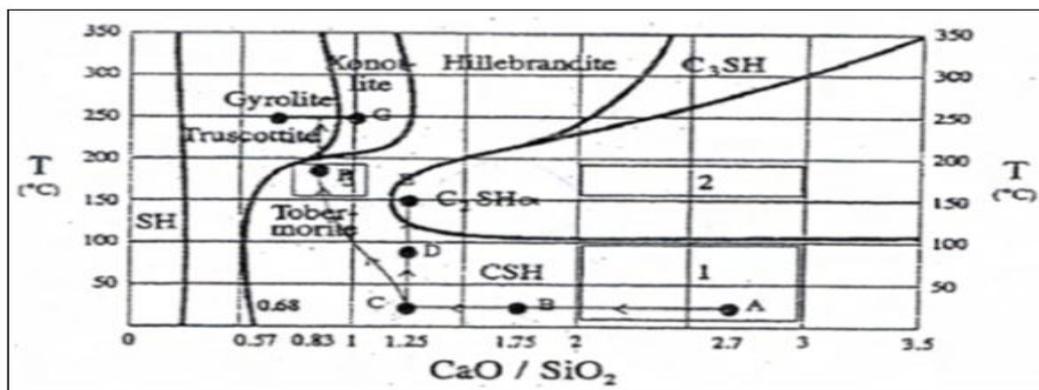


Figure I.12 : Diagramme de phase des C-S-H de Verbeck et Copeland [3].

A 20°C, le rapport C/S du ciment anhydre correspond à une valeur de 2,7 (point A) qui diminue à 1,75 (point B) durant l'hydratation et la formation des C-S-H. Si l'on ajoute de la fumée de silice, et grâce à la réaction pouzzolanique, on passe d'un rapport C/S de 1,75 à 1,25. Si on chauffe ce composé (point C) au-delà de 100°C, on forme une phase cristalline $C_2SH\alpha$ (point E) dont les propriétés mécaniques sont très médiocres selon Taylor [33].

Pour atteindre les points F et G, qui correspondent à la formation de tobermorite et de xonotlite (hydrates présentant de très bonnes propriétés mécaniques), on ajoute du quartz broyé en quantité qui va réagir lors du chauffage au-delà de 150°C (vers les 180°C), pour atteindre des hydrates de rapport C/S de 0,83.

6. DURABILITE

La durabilité des bétons à hautes et très hautes performances a fait l'objet d'études approfondies depuis le milieu des années 80. Les résultats concordent pour dire que l'amélioration des résistances mécaniques, de la compacité du matériau et la quasi absence de porosité connectée, améliorent grandement les propriétés de transfert [34]. Le choix d'une matrice ultra performante va donc dans le sens de la durabilité du composite.

Le développement des bétons de fibres est antérieur à l'usage des BHP et autres BTHP. Pourtant ces bétons ne semblent pas souffrir des mêmes maux que le béton armé, à savoir une corrosion des renforts. Il importe de dissocier le cas d'une fibre enrobée dans la matrice de celui où la fibre traverse une fissure. En fait, dans la plupart des applications structurelles, les BFM sont sollicités en dessous de la résistance à la fissuration de la matrice cimentaire ce qui limite grandement l'apparition de macro-fissure (i.e. > 0.3 mm, ouverture limite admissible par les règlements français pour les structures en béton armé).

Mais les bétons de fibres ne sont là encore pas représentatifs du composite étudié. D'une part, la fraction volumique des fibres est au mieux trois fois inférieure à celle de notre matériau, avec des dimensions de renfort millimétriques (40 à 300 μm dans notre cas), et des fibres isolées les unes des autres (leur nombre est de 2 ordres de grandeur supérieur ici). D'autre part, les études de durabilité s'intéressent majoritairement à des corps d'épreuves sains ou fissurés mais non chargés. On est loin du comportement sous sollicitations de service.

La durabilité d'un matériau cimentaire dépend bien évidemment de l'environnement dans lequel il est situé mais aussi de la qualité de sa microstructure. Ainsi, d'après Baron et al [34], un béton est durable si sa composition et son assemblage minéralogique sont choisis en

fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage. Les paramètres liés à la perméabilité et à la diffusivité (transports des espèces) sont les paramètres principaux à évaluer pour connaître la durabilité du béton.

6.1 Facteurs de durabilité du béton

L'eau dans les matériaux cimentaires est considérée comme un élément fondamental vis-à-vis de la durabilité de ces matériaux. Elle participe initialement à la prise du ciment et est présente dans le réseau poreux au terme de l'hydratation. Si l'on se réfère au Guide AFGC pour la conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages [AFGC. 2004], les indicateurs de durabilité fondamentaux qu'il faut déterminer, vis-à-vis notamment de la prévention de la corrosion des armatures, sont :

- la porosité accessible à l'eau ;
- le coefficient de diffusion des ions chlorure ;
- la perméabilité aux gaz ;
- la perméabilité à l'eau liquide ;
- la teneur en portlandite Ca(OH)_2 ;

Ces paramètres, qui ont fait l'objet de justification, sont intimement liés aux notions d'hydratation du ciment et de structuration des matériaux cimentaires qui conditionnent les propriétés de transport au sein de ces matériaux.

La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est donc d'une grande importance. En effet, la durabilité des structures est fortement influencée par la teneur en eau, puisque les agents agressifs (chlorures [4], gaz carbonique [14]) diffusent dans le béton essentiellement à travers le réseau poreux et que ces diffusions sont très dépendantes de la teneur en eau dans la porosité. Il est donc nécessaire de tenir compte des différents stades, depuis le mélange jusqu'au durcissement, où l'eau entre en jeu :

- la formulation des matériaux cimentaires avec l'eau initialement introduite dans la fabrication du matériau ;
- les conditions environnementales et la cure dont vont dépendre les effets du séchage couplé à l'hydratation du matériau ;
- la teneur en eau dans le matériau durci.

Dans la suite de cette partie, nous allons donner quelques éléments de compréhension sur certains paramètres de formulation et sur la mise en œuvre des matériaux cimentaires en rapport avec la teneur en eau.

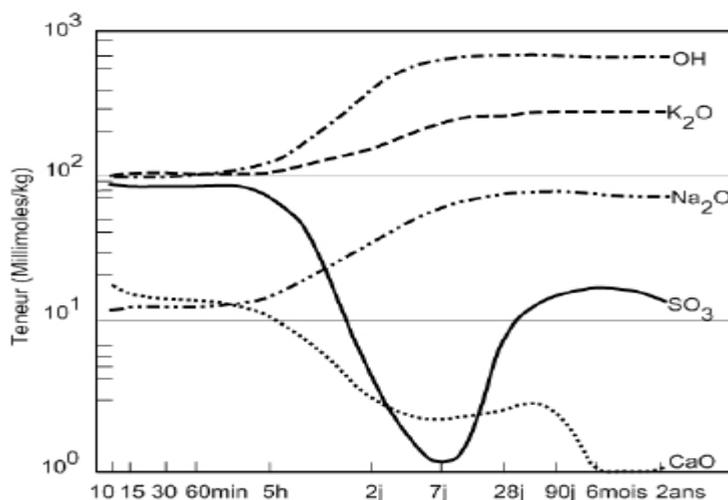


Figure I.13 : Evolution de la composition de la solution interstitielle d'après Longuet [35].

6.2 Absorption d'eau

Plusieurs recherches ont été menées sur l'absorption d'eau des BUHP afin d'évaluer la pénétration des agents agressifs au sein du matériau. Roux et al [36] ont réussi à mesurer une absorption d'eau des BUHP inférieure à $0,2 \text{ kg/m}^2$ après 15 jours, à comparer aux $2,75 \text{ kg/m}^2$ pour le béton ordinaire. Le BUHP est considéré comme un matériau possédant une porosité capillaire très faible et un matériau cimentaire très durable [3].

7. MICROSTRUCTURE DES PÂTES DE CIMENT DURCIES (PCD)

La connaissance de la structure des matériaux cimentaires est essentielle pour comprendre le comportement et les propriétés physiques ou mécaniques des pâtes de ciment durcies. Nous aborderons ici la structure des hydrates, la répartition de la porosité et les différents états de l'eau dans cette structure.

7.1 Morphologie des principaux hydrates

La phase solide d'une pâte de ciment durcie (PCD) est constituée de grains de ciment plus ou moins hydratés. La texture du matériau est extrêmement fine et divisée en raison de la nature colloïdale des composés C-S-H, mais comporte également des éléments plus grossiers tels que les cristaux de portlandite ou d'ettringite.

7.2 Les silicates de calcium hydratés C-S-H

La phase C-S-H (ou gel de C-S-H) est l'hydrate principal du ciment Portland, responsable de la structuration de la pâte de ciment durcie. Cette dénomination générale regroupe plusieurs variétés de silicates de composition $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)(\text{H}_2\text{O})_y$ où les valeurs de x et y dépendent de la teneur en calcium et en silicium dans la phase aqueuse [37]. La phase C-S-H est caractérisée par le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport C/S), qui est généralement compris entre 1,5 et 1,9 dans les pâtes de ciment [33].

Les C-S-H présentent une grande surface spécifique (caractéristique des gels colloïdaux) et une porosité d'environ 28 %. La morphologie du gel serait peu influencée par le type de ciment utilisé ou par le rapport E/C [37].

La littérature s'accorde actuellement à décrire la structure des C-S-H selon une organisation multi-échelle (Figure I.14) :

- les hydrates seraient constitués d'agglomérats de taille micrométrique, résultant de l'assemblage de particules plus fines (100 à 200 Å de diamètre),
- ces particules seraient des cristallites lamellaires, eux-mêmes constitués d'un nombre limité de feuillets (moins de 10, et généralement 2 à 3),
- à l'échelle nanométrique, chaque feuillet serait constitué d'une double couche de calcium en coordinence pseudo-octaédrique, encadrée par deux chaînes de silicium en coordinence tétraédrique. Cette structure serait assez proche de celle d'un silicate minéral naturel, la tobermorite [38].

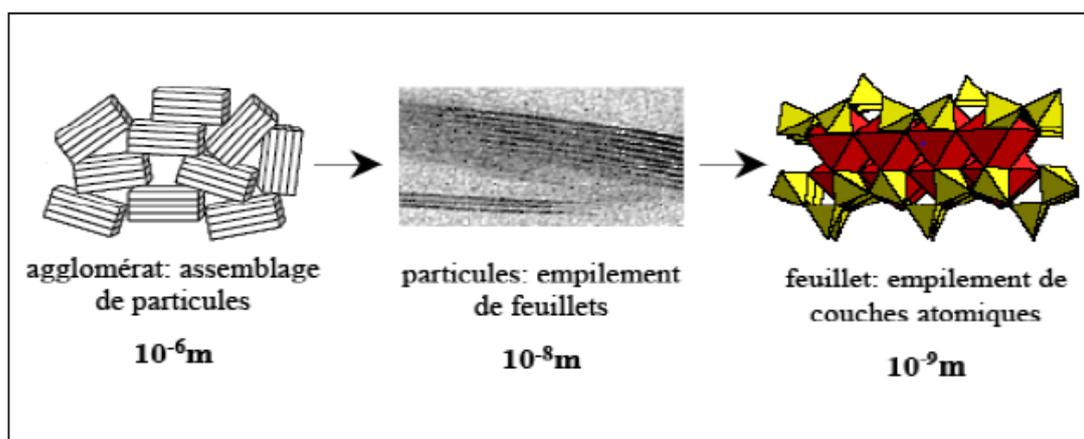


Figure I.14 : Structure des C-S-H à différentes échelles d'observation, d'après Minet [39].

A l'échelle micrométrique, les agglomérats de particules de C-S-H peuvent présenter des morphologies variées. Ainsi, à partir d'observations microscopiques, Diamond [40] et Taylor [33] ont identifié les quatre types morphologiques suivants :

- ✓ **Type I**, majoritaire aux premiers âges de l'hydratation, constituée de fibres de moins de 2 μm ;
- ✓ **Type II**, nids d'abeilles, forme alvéolaire ;
- ✓ **Type III**, majoritaire aux temps longs, avec une structure plus massive formée par agrégation de grains de 300 nm ;
- ✓ **Type IV**, structure dense et amorphe qui n'est observée que pour les pâtes vieilles.

Les C-S-H de Types I et II cristallisent au début de la prise, dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Les types III et IV sont les hydrates tardifs (ou hydrates internes) qui peuvent occuper la place des grains anhydres initiaux. Les différentes formes du gel C-S-H sont présentées sur la Figure I.15 [16].

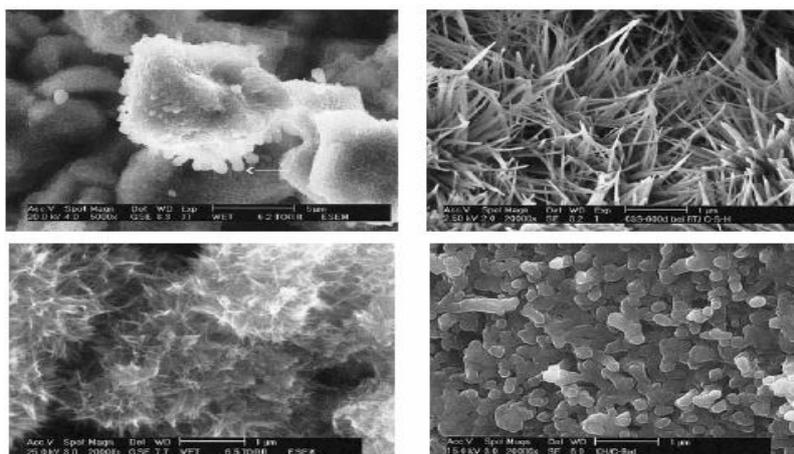


Figure I.15 : Diversité des formes du gel C-S-H., source : Stark et al [16].

a. *La portlandite*

La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est la seule phase solide présente sous forme relativement pure dans la pâte de ciment durcie, et ne comporte en général que de petites quantités d'ions étrangers. Elle cristallise sous forme de plaquettes hexagonales qui peuvent être massives (figure I.16 « a »), et se retrouve dans l'espace situé entre les grains de ciment partiellement hydratés. En raison de la grande taille de ses cristaux, la portlandite présente une faible surface spécifique. La portlandite peut également se développer sous une forme amorphe lorsque l'espace entre grains de ciment est trop réduit pour permettre la cristallisation.

b. L'ettringite

L'ettringite cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (figure I.16 « b ») rayonnant autour des grains de ciment anhydre. La forme et la taille de l'ettringite dépendent directement de la nature des ions de la phase interstitielle, de la concentration en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de la température. Dans certains cas, la formation d'ettringite peut s'accompagner de gonflement. Plusieurs explications peuvent être à l'origine de ce phénomène: expansion par croissance cristalline, gonflement lié à l'absorption d'eau par les particules d'ettringite [40], gonflement lié à la pression de cristallisation de l'ettringite, expansion par pression osmotique sur une membrane semi-perméable entre la phase interstitielle et la surface des grains anhydres, gonflement par formation de monosulfoaluminate de calcium hydraté [41].

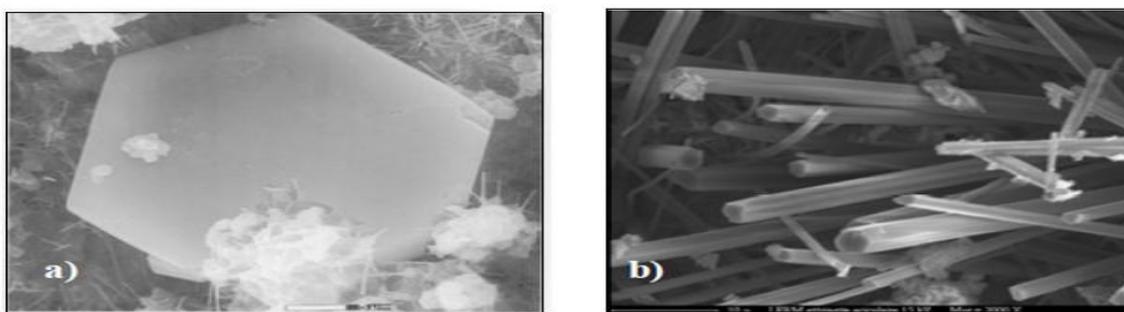


Figure I.16 : Observation en microscopie électronique à balayage (a) d'une plaquette hexagonale de portlandite [42] et (b) d'ettringite aciculaire (sous forme d'aiguilles) [43].

8. INTRODUIRE LES DIFFERENTES METHODES DE FABRICATION

- Tolérances sur les Prémix

Les tolérances sur le Prémix sont fixées et contrôlées conformément à la fiche qualité du producteur qui doit accompagner chaque lot livré.

Il est recommandé d'effectuer des prélèvements conservatoires sur chaque fourniture.

- Tolérances sur les matières premières

La qualité des matériels de dosage et les méthodes de conduite doivent permettre de satisfaire une tolérance de $\pm 2\%$ de chaque composant pesé.

Pour les épreuves d'étude, ces tolérances devraient être réduites sur les poudres à $\pm 1\%$ si le fournisseur de prémélange sec est capable de garantir cette précision sur chaque constituant entrant dans le premix lors de sa fabrication.

- **Exigences particulières sur le matériel de fabrication**

Dans le cas de formulation sans prémélange à sec, des mesures de teneur en eau des sables, des gravillons et cailloux sont effectuées régulièrement pour permettre la correction des quantités d'eau à introduire.

La saturation, sans excès d'eau, des gravillons et cailloux peut faciliter une meilleure maîtrise de la teneur en eau.

Les balances ont des portées appropriées à la capacité nominale C exprimée en m³ du malaxeur. Les portées (en tonnes) sont inférieures à :

- pour les granulats, ciment, eau, ou prémix, une valeur permettant d'obtenir une précision de $\pm 2 \%$
- fumée de silice pesée séparément : 0,1 C
- autre addition pesée séparément : 0,15 C
- ciment et une ou plusieurs additions pesées simultanément (dans ce cas, le ciment est introduit en premier sur la balance) : 0,6 C

- **Transport des BFUP**

La durée entre la fabrication du BFUHP et sa mise en place doit rester compatible avec, d'une part les moyens de production et de mise en œuvre, et d'autre part les conditions de vibration.

Aucun ajout d'adjuvant ou d'eau n'intervient après la fabrication du béton.

- **Mise en œuvre des BFUHP**

a. Mise par vibration

La mise en œuvre des BFUHP est à faire avec précautions compte tenu de la fluidité de certains d'entre eux (autoplaçants).

Des hauteurs de chute supérieures à 0,50 m ne sont pas recommandées. Si celles-ci ne peuvent être évitées, il convient de mener une étude justificative préalable démontrant a non ségrégation des fibres de la pâte de ciment et l'absence de formation d'oursins.

Les moyens de vibration doivent être adaptés à la fluidité et à la consistance particulière des BFUHP.

Un coulage en continu est également recommandé. Dans le cas d'un phasage discontinu avec interruptions de bétonnage, ou d'un délai important entre coulages successifs, une croûte superficielle est susceptible de se former en surface de la dernière couche coulée.

La dessiccation de surface doit être évitée et un mariage des couches doit alors être effectué (par piquage ou autres) afin d'assurer la continuité des fibres.

b. Bétonnage par temps froid

Lorsque la température extérieure descend au-dessous de + 5°C, tout bétonnage est déconseillé sauf dispositions spéciales telles que :

- réchauffage des granulats et/ou de l'eau de gâchage,
- utilisation de coffrages en bois épais ou isolé,
- utilisation d'un adjuvant accélérateur de prise et de durcissement.

Lorsque la température extérieure est comprise entre + 5°C et + 10°C au moment du bétonnage, des éprouvettes d'information sont confectionnées pendant le bétonnage, et sont conservées dans des conditions climatiques identiques à celles de l'ouvrage.

Une éprouvette est testée en compression juste avant le décoffrage qui n'est autorisé que si la résistance le permet et l'opération est répétée si nécessaire.

Tous les produits doivent être stockés conformément aux prescriptions des fournisseurs.

Lorsque la température extérieure est supérieure à 35°C, des précautions particulières doivent être prises pour éviter des températures trop importantes au cœur des pièces. Ces précautions sont analogues aux dispositions qui peuvent être retenues pour des bétons classiques (refroidissement de l'eau de gâchage, ...).

c. Cure du béton

La cure des BFUP doit être systématique et particulièrement soignée, en raison d'un ressuage très faible à inexistant.

Les dispositions retenues doivent être validées par les épreuves de convenance.

La cure des reprises est systématique : elle doit empêcher notamment la dessiccation du béton avant sa prise, et sa microfissuration pendant la prise. Elle doit être soignée et validée par une épreuve de convenance spécifique.

9. CONCLUSIONS

Cette revue bibliographique a permis de dresser de manière non exhaustive l'état de l'art des BFUP. Par définition, les BFUP sont les matériaux cimentaire de résistance caractéristique à la compression supérieure à 150 MPa et pouvant aller jusqu'à 250 MPa.

La formulation d'un BFUP se caractérise par d'une quantité importante et onéreuse de liant, ciment et additions ultrafines, un faible rapport E/C, par l'utilisation de sable fin et de fibres métalliques pour les BFUP structuraux, et enfin d'une quantité élevée de superplastifiant à haut réducteur d'eau pour garantir la bonne dispersion des fines.

Le traitement thermique peut être appliqué à ces bétons pour améliorer leurs résistances mécaniques l'ultrafine la plus souvent employée est la fumée de silice, mais la chamotte permet d'obtenir des performances assez proches de celles avec la vase, présente l'avantage d'être moins couteux et plus disponible que la vase et dès lors représenter une solution pour réduire le coût de la matière première des BFUP.

Le caractère thixotropique des BFUP est lié au volume de pâte important et au faible rapport E/C.

- au-delà de 90°C, permet généralement d'augmenter la résistance en compression de l'ordre de 12 à 40% par rapport aux mêmes BFUP sans traitement thermique. Quant au traitement thermique de type I à température plus modérées, il permet uniquement d'accélérer la prise. Certaines études récentes sont parvenues à atteindre des résistances élevées sans le recours aux traitements thermiques et grâce à l'optimisation de la compacité du mélange, afin d'améliorer le bilan énergétique et économique.

Outre la résistance élevée en compression, les BFUP possèdent également une résistance en traction élevée, qui est généralement supérieure à 6 MPa. L'incorporation de fibres métalliques permet d'améliorer fortement le comportement post-fissuration en traction.

A l'issue de ce travail bibliographique, nous avons défini les objectifs d'étude suivants : Dans un premier temps, nous allons travailler sur la mise au point de formulation de BFUP utilisant la chamotte en substitution totale de la vase et des granulats locaux, et ce sans traitement thermique qui est très énergivore. Ces formulations originales seront établis en visant le coût de production le plus faible possible de manière à proposer des applications préfabriqués structurales compétitives.

Matériaux
et Procédures expérimentales

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps caractériser les matériaux employés dans cette étude en présentant leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. Les compositions des bétons seront ensuite détaillées après avoir expliqué la méthode de formulation utilisée. Les procédures de fabrication et les séquences de malaxage mises en place seront également définies.

Dans un deuxième temps, nous présenterons le programme expérimental mené sur les différentes formulations de bétons. Les méthodes et essais utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques instantanées et différées, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques traduisant la durabilité, seront explicités.

2. MATERIAUX UTILISES

2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est le ciment Portland (CPJ) CEM II/A 42,5 selon la norme NA 442, provenant de l'usine de Sour El Ghozlane, Il contient 14% d'ajouts (calcaire et pouzzolane), dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment CEM II/A 42,5.

Eléments	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.A.F	RI	CaO libre
Teneurs (%)	62,78	4,65	18,88	3,20	2,42	0,10	0,64	2,41	4,60	1,29	0,94

Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CEM II/A 42,5.

Minéraux	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneurs (%)	19,48	50,82	8,33	8,45

Tableau II.3 : Résistance mécaniques du ciment CEM II/A 42,5.

Résistances [MPa]	2 j	7 j	28 j
à la compression	21,9	38,9	48,1
à la traction par flexion	4,4	6,7	7,9

Tableau II.4 : Caractéristiques physique du ciment CEM II/A 42,5.

Surface spécifique (SSB)		4 184 cm ² /g	Retrait (µm/m)	03 jours	345,85
Masse spécifique		3,08 g/cm ³		07 jours	555,93
Consistance normale		25,51%		28 jours	731
Temps de prise (mn)	Début	160	Gonflement (µm/m)	03 jours	2,78
	Fin	310		07 jours	11,17
Consistance normale (%)		25,5		28 jours	15,28
Expansion à chaud		0,5 mm			

2.2 Le sable

Dans cette étude nous avons utilisé un sable de dunes (SD) de couleur jaune provenant de la région d'Ain El Beida (Wilaya d'Ouargla), le tableau II.5 présente sa composition chimique.



Figure II.1: Analyse chimique des sables utilisés.

Tableau II.5 : Composition chimique du sable.

Composants	CaO	AL ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Teneur (%)	0,45	2,23	94,40	0,06	0,36	1,13
Composants	Ti ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Pert à feu	
Teneur (%)	0,04	0,17	0,01	0,33	0,82	

Autres propriétés physiques :

Masse volumique apparente 1 462 kg/m³.

Masse volumique absolue 2,70 g/cm³.

Équivalent de sable visuel88%.

Équivalent de sable à piston75%.

Absorption d'eau 2,70%.

On note que le sable utilisé est très propre, avec absence presque totale de fines argileuses, un défaut de plasticité du béton est à craindre, d'où une augmentation du dosage en eau est nécessaire.

On remarque que le sable de dunes présente un coefficient d'absorption d'eau qui dépasse un peu la valeur admissible de 2,50 %, ceci aura certainement un impact sur la fluidité du béton.

Le tableau II.6 présente les résultats de l'analyse granulométrique de notre sable, dont le module de finesse calculé est $M_f = 1,33$.

Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable de dunes.

Tamis en (mm)	Refus cumulés en (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisâts cumulés en (%)
0,63	0	0,00	100,00
0,315	426,36	35,53	64,47
0,16	1164,72	97,06	2,94
0,08	1199,76	99,98	0,02
F.T	1200	100,00	0,00

2.3 L'eau

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 dans notre étude est l'eau potable du réseau publique de la ville de Boumerdès.

Tableau II.7 : Composition chimique de l'eau.

Désignations	MS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	T° (C)	pH
mg/l	Traces	116	36	80	3	140	170	305	5	19	7,9

MS : Matières en suspension

2.4 L'ADJUVANT

L'adjuvant utilisé est un MEDAFLOW 3041 R fourni par la société GRANITEX de Oued Samar, Alger. C'est une solution liquide se diluant facilement dans l'eau de gâchage. (Tableau II.8).

Tableau II.8 : Caractéristiques du super-plastifiant MEDAFLOW 3041 R.

Forme	Couleur	Aspect	Densité	pH	Teneur en chlore
Liquide	Brun clair	Liquide	1,08 ± 0,01	6 – 6,5	30%+1

2.5 LES FIBRES D'ACIER

Il s'agit des fibres MEDAFAC, se sont des fibres d'acier ondulées, leurs caractéristiques techniques, permettent d'améliorer les résistances mécanique du béton.

Tableau II.9 : Caractéristiques des fibres d'acier MEDAFAC.

Forme	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Densité (apparente) g/cm ³	Résistance à la traction (MPa)
ondulée	50	2	1,05	1100

On peut incorporer les fibres d'acier dans les BHP chaque fois que la fragilité du béton représente une limitation à son utilisation. Par exemple, les fibres d'acier peuvent être utilisées dans des régions où les risques sismiques sont élevés et dans des éléments où la résistance au cisaillement du béton doit être augmentée. Dans ce contexte, les chercheurs s'intéressent

actuellement au remplacement des armatures transversales par les fibres métalliques du fait que le coût de la mise en place d'un grand nombre de cadres peut devenir excessif et ou tout au moins plus coûteux que celui des fibres [44].

L'introduction des fibres MEDAFAC se fait :

- Soit dans la centrale à béton avec les agrégats ou en fin de mélange.
- Soit dans le camion malaxeur sur chantier avec un malaxage supplémentaire de quelques minutes à grande vitesse.
- Soit dans la bétonnière sur chantier, avec un malaxage supplémentaire de quelques minutes.

Dans tous les cas veiller à garantir une parfaite homogénéité du mélange béton-fibres.



Figure II.2 : Fibres métalliques MEDAFAC.

2.6 CHAMOTTE



Figure II.3 : Chamotte du kaolin DD3.

Dans ce travail, nous avons utilisé une chamotte de récupération industrielle (unité céramique de Guelma). Celle-ci provient du broyage des assiettes qui servent de conteneurs pour les objets céramiques durant leur cuisson. Elle résulte de la calcination du kaolin DD3 à une température voisine de 1350°C. La figure II.3 montre un échantillon de la poudre de chamotte utilisée.

Il est bien connu que durant la cuisson, le kaolin subit un important retrait [45].

Ce retrait conduit à une importante fissuration des produits tels que cela est montré sur la figure II.4. La chamotte, ayant déjà subi des transformations irréversibles au cours de sa cuisson, permet d'apporter la stabilité thermique et dimensionnelle nécessaires au kaolin durant la cuisson des échantillons.

Une observation, par microscopie électronique à balayage (MEB), d'un échantillon de chamotte a montré que les grains sont de formes irrégulières (figure II.5) et que leurs surfaces sont extrêmement rugueuses (figure II.6). Cet état de surface offre, de ce fait, au kaolin DD3 une meilleure possibilité d'adhérence. L'analyse par diffraction des rayons X de cette chamotte (figure II.7) a montré qu'elle contient surtout de la mullite (JCPDS 79 1455), de la cristobalite (JCPDS 76-0941) et fort probablement du quartz (JCPDS 74-0764).

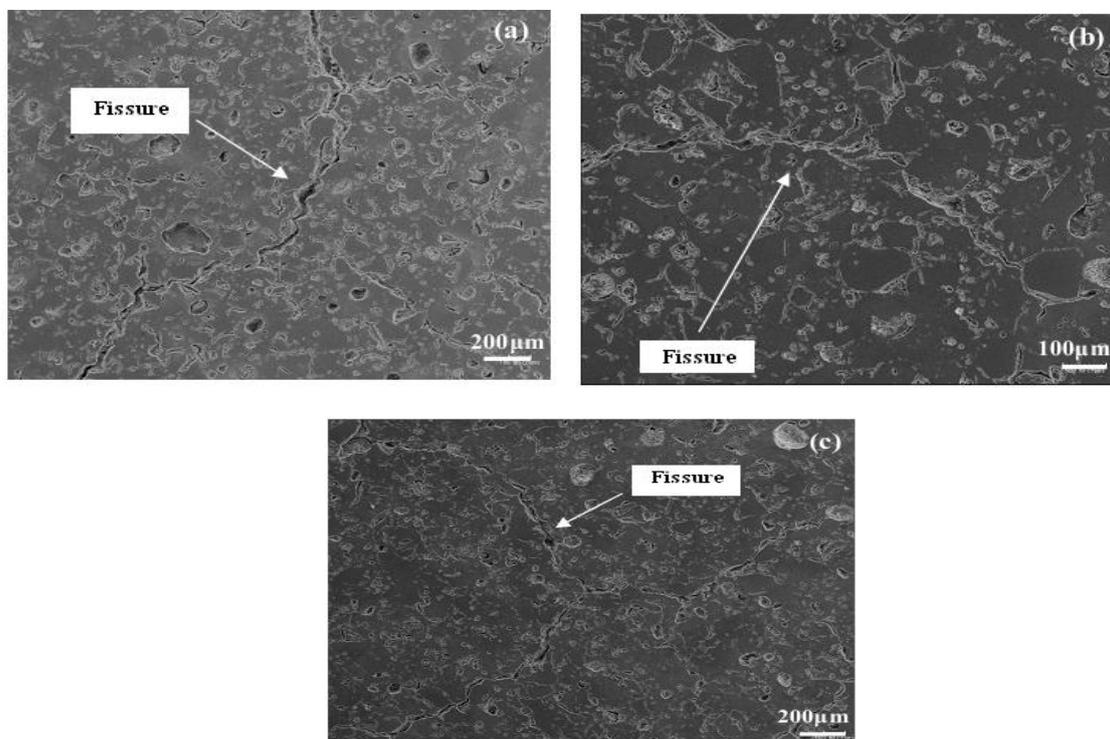


Figure II.4 : Surface polie du kaolin DD3, cuit durant une heure à: (a) 1250°C, (b) 1350°C et (c) 1450°C.

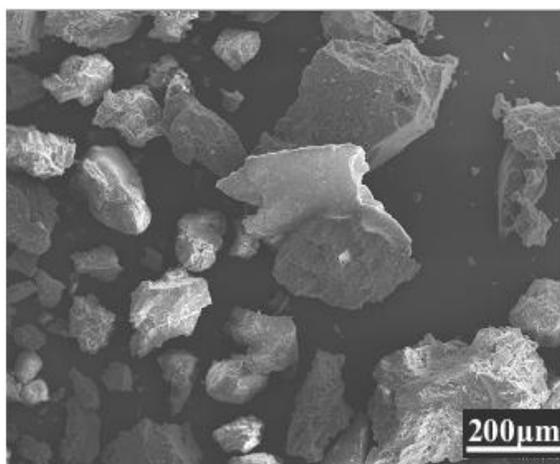


Figure II.5 : Micrographie d'un échantillon de grains de chamotte $100 \mu\text{m} \leq \Phi \leq 250 \mu\text{m}$.

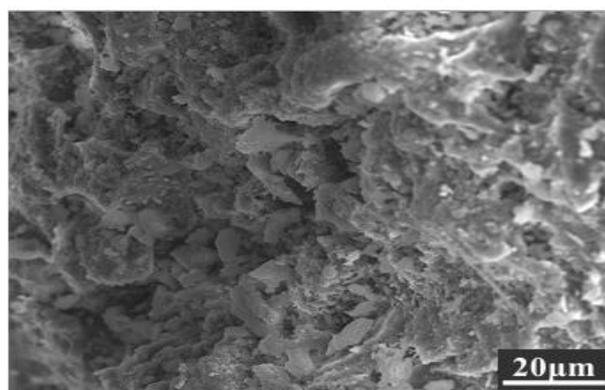


Figure II.6 : Micrographie de la surface d'un grain de chamotte.

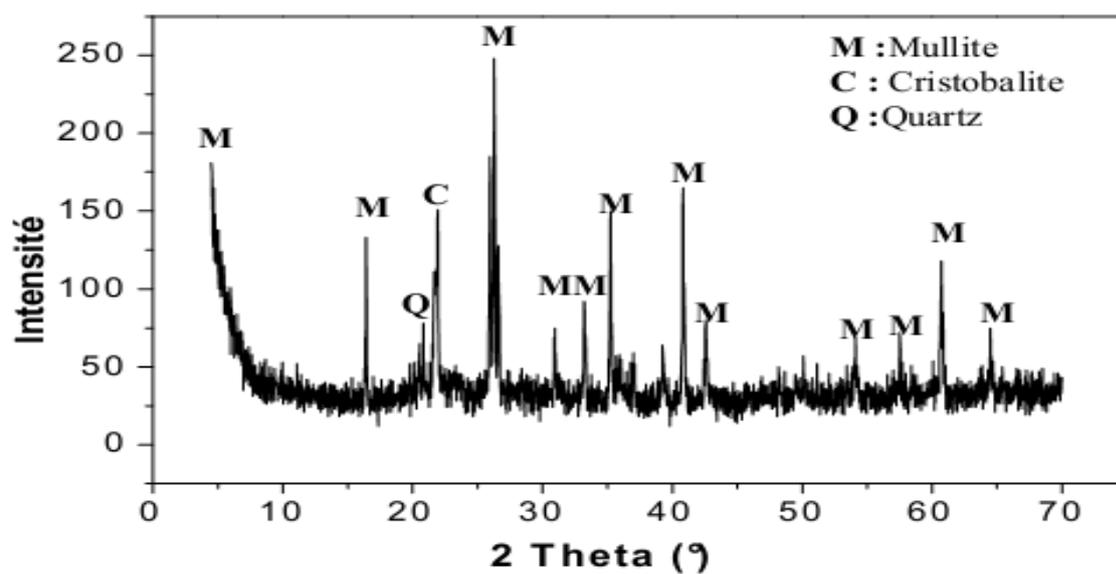


Figure II.7 : Spectre de DRX de la chamotte utilisée.

Tableau II.10 : Caractéristiques physiques de la chamotte.

SSB	6080 cm ² /g
Masse volumique	2,60 g/cm ³
Couleur	Rouge brique

2.6.1 Composition chimique

Les analyses chimiques réalisées sur le kaolin DD3 sont données dans le tableau II.11. La composition chimique d'une kaolinite pure de formule Si₂Al₂O₅(OH)₄ ou 2SiO₂.Al₂O₃.2H₂O exprimée en pourcentage massique d'oxyde est la suivante [45] :

Tableau II.11 : Composition chimique pondérale de kaolin.

Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
DD3	42,40	36,90	0,24	2,16	0,06	0,50	0,19	0,20	0,02	0,00	17,33	1,15

Le développement de la réaction pouzzolanique du 7 au 28 jour entre la portlandite et la silice ou l'alumine amorphes contenues dans le déchet de brique est étudié par la diffraction des rayons X. Les résultats de cette analyse sont donnés dans la Figure II.8.

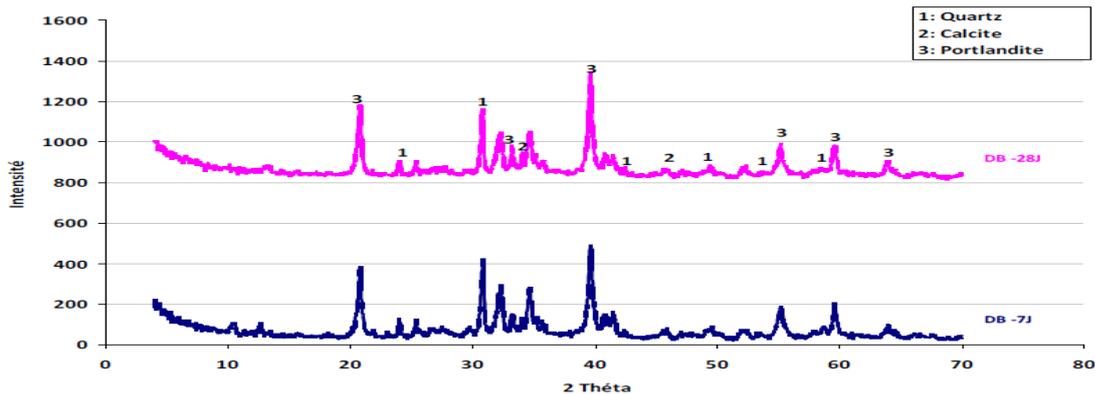


Figure II.8 : Diffractogrammes RX des pâtes « chaux-chamotte » après 7 et 28 jours de durcissement.

Selon les résultats de DRX (Figures II.8), il est constaté après 7 jours d'hydratation, la formation de C-S-H (2θ/30-40°) et de la portlandite. La formation de ces minéraux, qui sont les principaux produits de l'hydratation, en plus de la faible intensité des pics de quartz,

montrent que la réaction pouzzolanique entre la portlandite et la silice est initialement rapide, ce qui peut développer une résistance mécanique convenable à court terme. En revanche, après 28 jours de durcissement les pics de quartz sont moins intenses par rapport à 7 jours, ce qui montre que la réaction pouzzolanique est bien effective.

Selon ces analyses, nous pouvons conclure que le déchet de brique broyé à 80 μm présente une activité pouzzolanique, ce qui est en conformité avec le test de chaux saturée.

2.6.2 Composition minéralogique

Tableau II.12 : Récapitulatif des phases minéralogiques décelées par diffraction X.

Phases minéralogiques	Kaolinite	Halloysite	Quartz	Muscovite	Albite	Orthose
DD3	+	+	+	+	-	-
Phases minéralogiques	Gibbsite	Anatase	Rutile	Gypse	Calcite	Todorokite
DD3	-	-	-	+	+	+

L'activité pouzzolanique du déchet de brique et son développement dans le temps de 7 à 28 jours de durcissement ont été étudiés par l'analyse thermogravimétrique (ATG). Les diagrammes DTG des pâtes des mélanges « chaux-chamotte » sont présentés dans la Figure II.9.

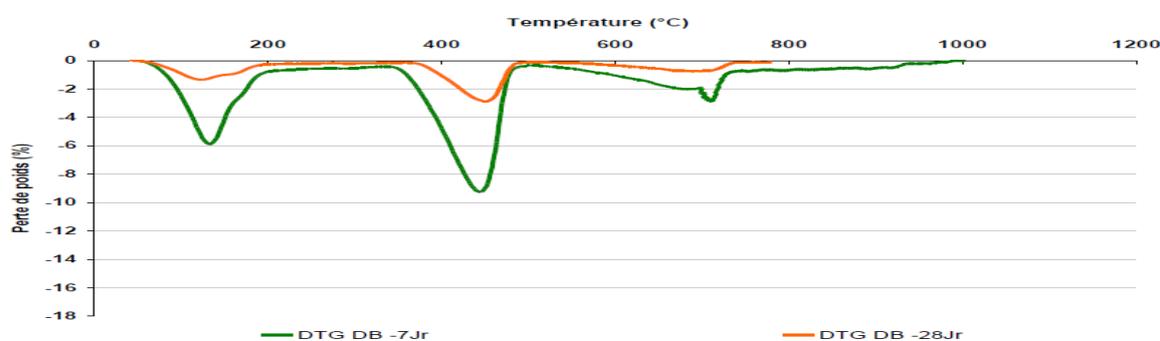


Figure II.9 : Diagrammes DTG des pâtes « chaux- chamotte » à 7 et 28 jours de cure.

En examinant les diagrammes DTG (Figure II.9), nous constatons que la quantité de la portlandite et de la calcite diminue avec le temps d'hydratation de 7 à 28 jours. Ceci apparaît vers 500°C pour la portlandite et vers 700°C pour CaCO_3 . Cette diminution est due à la consommation de la portlandite par la silice en formant plus de C-S-H, ce qui témoigne la réaction pouzzolanique du déchet de brique et confirme les résultats obtenus par le test de chaux saturée et par DRX. Le pic entre 100 et 200°C ne permet pas de distinguer l'eau libre dégagée des pores des pâtes à celle liée dans les C-S-H, et par conséquent la formation des C-S-H n'est pas clairement montrée par ATG dans ce cas.

2.6.3 Analyse thermique

Les transformations du kaolin au cours de sa cuisson ont été suivies par analyse thermo différentielle et thermo gravimétrique, à l'aide d'un analyseur de type Setaram 85. Les analyses TD et TG ont été complétées par des analyses de diffraction des rayons X (figure 10), pour identifier les phases formées (diffractomètre Rigaku, Geigerflex diffractometer Cu k_{α}). Globalement, on peut déceler les phénomènes suivants:

➤ *Dégagement de l'eau adsorbée au-dessus de 100°C*

La courbe ATD révèle un premier phénomène endothermique ($105^{\circ}\text{C} \rightarrow 160^{\circ}\text{C}$), accompagné d'une faible perte de masse (4%) sur la courbe de l'ATG.

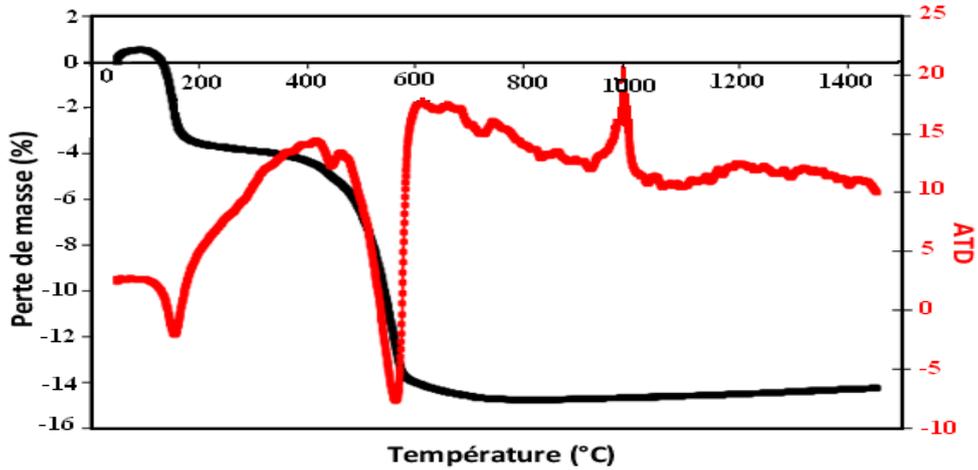


Figure II.10 : ATD et ATG du kaolin DD3.

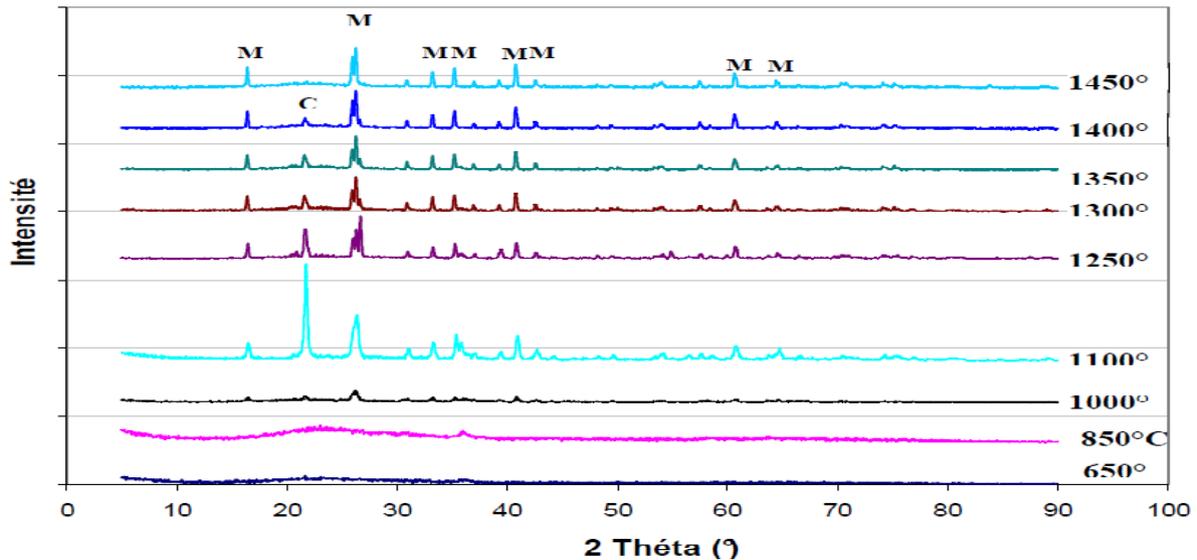
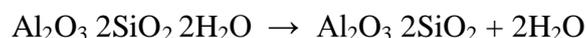


Figure II.11: Spectres de DRX du kaolin DD3 pour différentes températures de traitement (C : cristobalite, M : mullite).

➤ *Calcination des matières organiques et décomposition de la kaolinite*

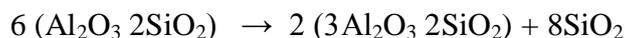
La calcination des matières organiques est évidente à partir de la température 200°C (ATG). La décomposition de la kaolinite en métakaolinite est justifiée par le deuxième phénomène endothermique visible sur la courbe entre (400°C → 570°C) :



Au-delà de ce pic, la deshydroxylation se poursuit faiblement jusqu'à environ 850°C (voir ATG). L'analyse par diffraction des rayons X, montre que le spectre correspondant à 850°C présente un dôme prononcé entre 15° et 30°, suggérant que la métakaolinite résultante est amorphe. En effet, durant la deshydroxylation, la perturbation des feuillets constituant la kaolinite cause son désordre.

La perte de masse associée à cette deshydroxylation arrive à 11,50 % ce qui permet d'estimer la teneur en kaolinite qui est de : 82 %.

La restructuration du métakaolin se fait vers 986 °C, selon l'équation :



Au-delà de cette température aucun pic ATD n'est décelable, mais avec la courbe dérivée (DDTA) un pic est observé vers 1400 °C qui peut être attribué à la cristallisation de la silice amorphe produite par la réaction de la deshydroxylation de la kaolinite, en cristobalite.

Nous observons nettement la destruction de la gibbsite vers 436 °C, avec une perte de masse d'eau de l'ordre de 3 %.

La faible perte de masse (0,80 %) au-delà de 1000 °C peut être attribuée au départ d'eau de la todorokite. Au cours du traitement thermique, on assisterait donc à une suite de transformations allant du métakaolin à la mullite en passant par un état amorphe.

Il existe deux types de remplissage granulométrique : discontinu et continu ; le premier consiste en fractions de grains séparées, par contre le deuxième est basé sur le remplissage du volume par les grains de toutes les dimensions. La distribution granulométrique de la chamotte a été effectuée par tamisage. Le béton étudié est considéré comme un matériau composite constitué d'une matrice composée de particules très fines (tailles inférieures à 200 microns) ; alors que les granulats moyens et gros jouent le rôle de renfort. Les différents pourcentages des tailles de grains de la chamotte utilisée sont présentés dans la figure II.12.

Tableau II.13 : Analyse granulométrique du kaolin.

Ouvertures des tamis en μm	Refus cumulés en g	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
200	0,10	0,50	99,5
160	0,20	01	99
125	0,40	02	98
100	0,70	3,50	96,5
80	1,80	09	91
63	3,30	16,50	83,5
50	5,90	29,50	70,5
40	19	95	0,5
Fonds de tamis	20	100	00

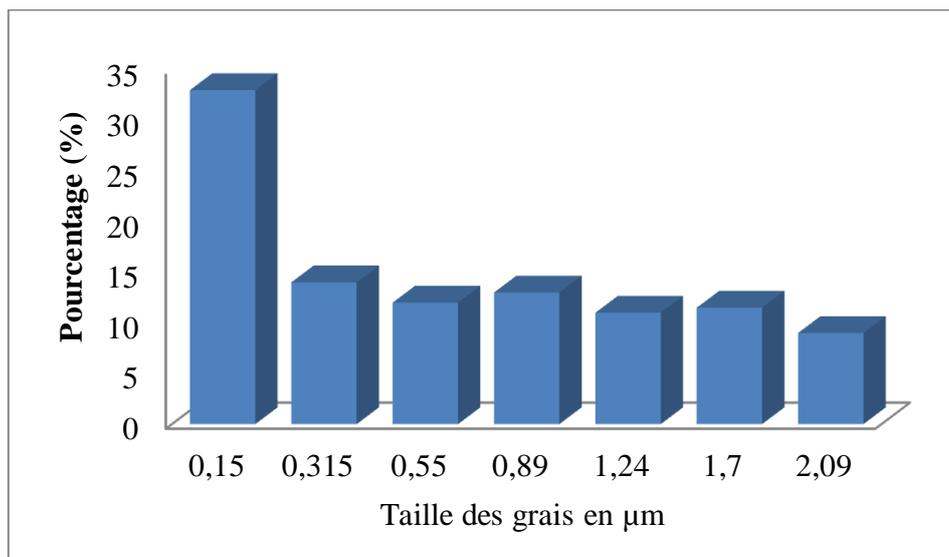


Figure II.12 : Différents pourcentages des tailles de grains de la chamotte utilisée.

2.7 LA VASE

Le barrage de Hamiz, d'une capacité de 21 millions de m^3 a été mis en exploitation en 1935 (figure II.13). Ce barrage est actuellement menacé par l'envasement à plus de 50% de sa capacité initiale. Nous avons utilisé des échantillons de vase du barrage de Hamiz, prélevé à 3 m en amont de sa digue.



Figure II.13 : Une vue du barrage de Hamiz.



Figure II.14 : Situation géographique du barrage de Hamiz.

La vase prélevée est convenablement préparée. Le processus de préparation de la vase (figure II.15) est comme suit :

- La vase est tout d'abord séchée à l'étuve à 105°C ;
- Concassée pour faciliter son broyage ;
- Puis broyée à l'aide d'un broyeur électrique ;
- Et enfin, tamisée par voie sèche au tamis de 80µm.



Etuve de séchage



Le broyeur



Vase obtenue après tamisage



Tamisage électrique après calcination

Figure II.15 : Processus de préparation de la vase draguée.

2.7.1 Calcination

La calcination est un traitement thermique .L'objectif de la calcination est de rendre les matériaux réactifs par déshydroxylation (pouzzolane artificielle). Nous avons menés cette calcination à une température de 750°C. Le dispositif de calcination utilise est un four électrique de laboratoire (figure II.16).



Figure II.16 : Calcination de la vase.

Les échantillons sont calcinés une calcination lente dite à lit fixe, elle est maintenue pour une durée de 6 heure.

La composition chimique réalisée par fluorescence X de la vase du barrage de Hamiz sous forme d'oxydes est présentée dans le Tableau II.14 et la Figure II.16. On constate que l'oxyde SiO_2 est prédominant dans les sédiments fluviaux urbains, suivie d' Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O et Na_2O .

Tableau II.14 : Composition chimique de la vase du barrage de Hamiz.

Constituants	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	PAF
Teneur %	49,47	16,51	5,91	6,45	1,42	0,061	2,22	0,68	0,262	0,809	16,40

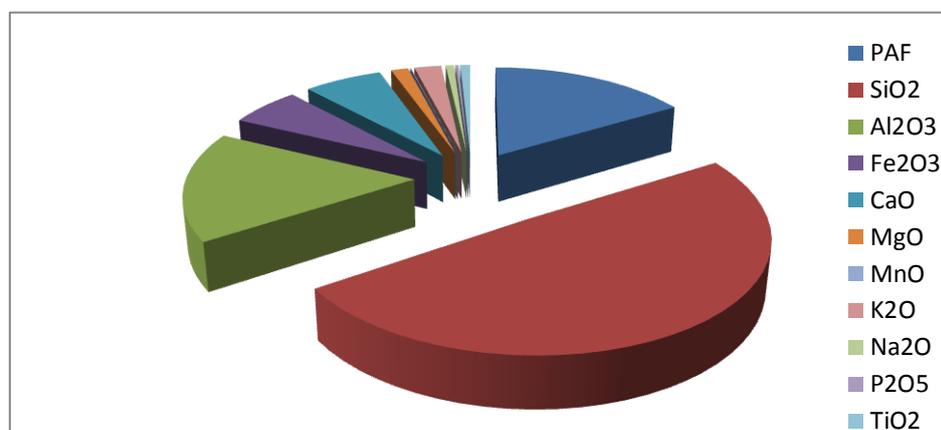


Figure II.17 : Analyses chimiques de la vase du barrage de Hamiz.

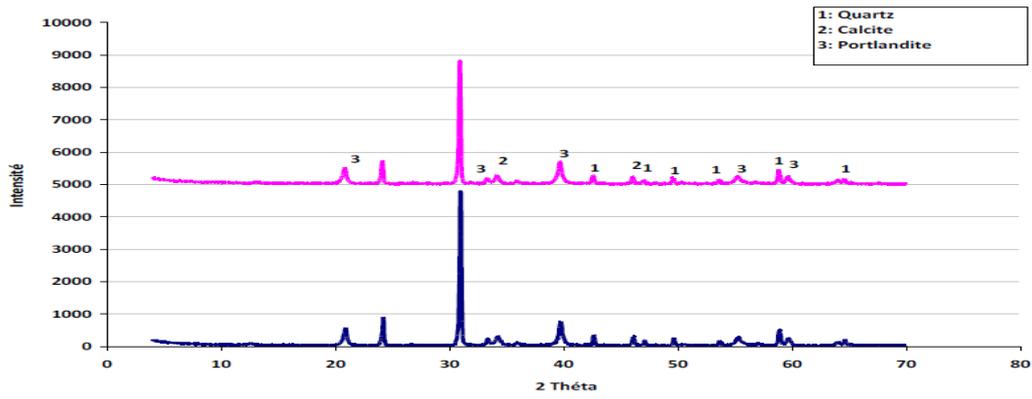


Figure II.19 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase brute après 7 et 28 jours de durcissement.

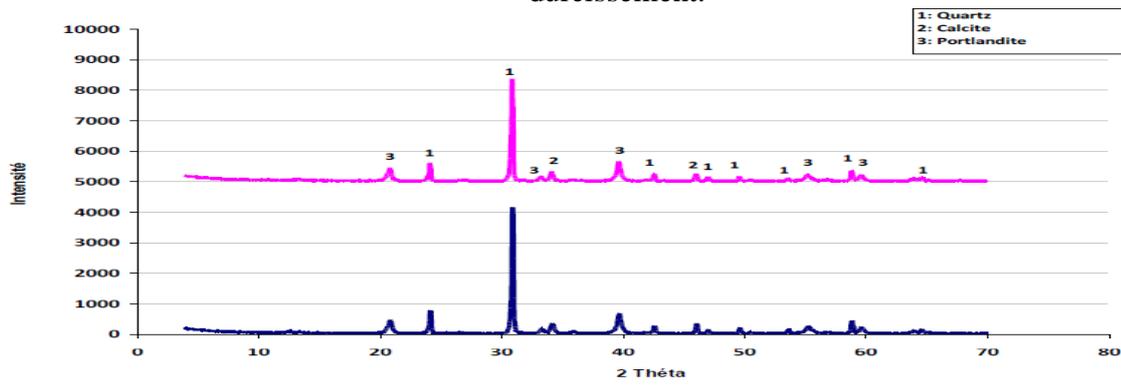


Figure II.20 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase calcinée à 500°C, après 7 et 28 jours de durcissement.

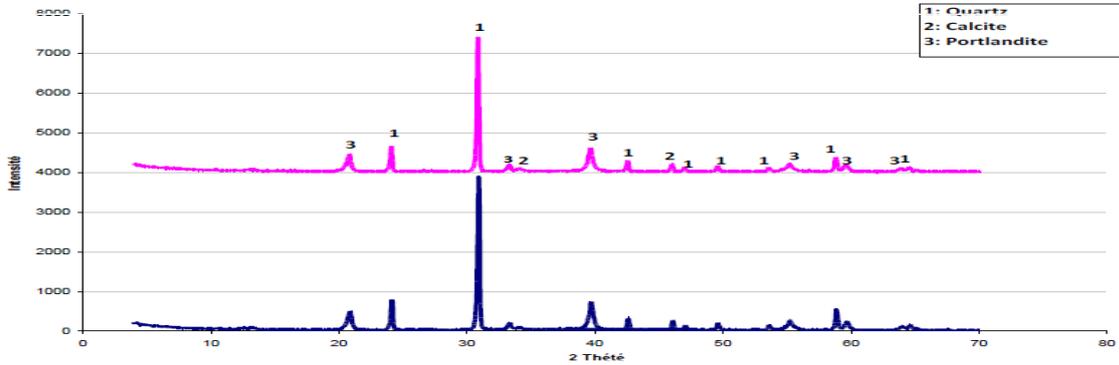


Figure II.21 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase calcinée à 700°C, après 7 et 28 jours de durcissement.

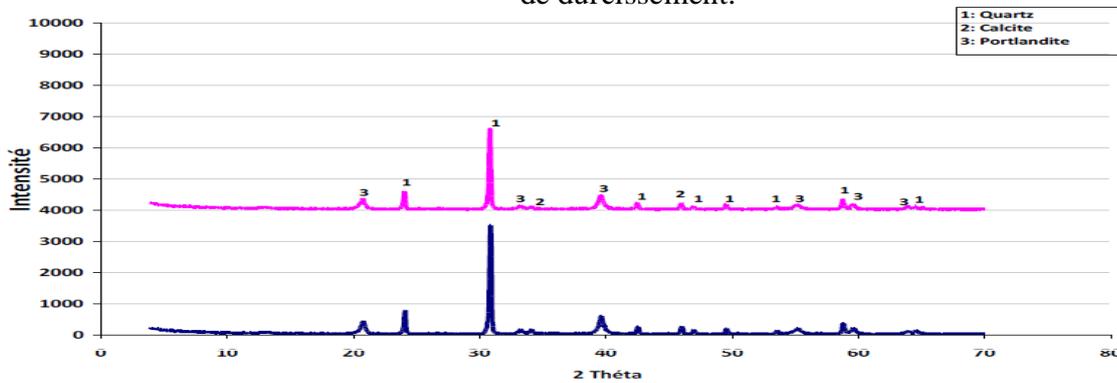


Figure II.22 : Diffractogrammes RX des pâtes de vase calcinée à 800°C, après 7 et 28 jours de durcissement.

Le tableau II.16 récapitule les différents résultats de la caractérisation physique de la vase calcinée.

Tableau II.16 : Caractéristiques physiques de la vase calcinée.

Masse volumique apparente	0,51 g/cm ³
Masse volumique absolue	2,62 g/cm ³
Surface spécifique de Blaine	7964 cm ² /g

3. COMPOSITION DES BFUP

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps présenter les compositions des BFUP, quatre compositions sont formulées selon la méthode empirique.

Le principe de formulation des bétons fluides se distinguent par le fait qu'ils présentent un volume de mortier (ciment + eau + adjuvants + chamotte + vase + éventuellement les sables fins) plus élevé que les bétons classiques. Le Tableau II.17 présente les quatre formules retenues après optimisation du squelette granulaire et du dosage en superplastifiant, à partir du sable de dunes avec ajout de chamotte, de vase de barrage et de fibres.

Tableau II.17 : Formulations des BUHP (kg/m³).

Type de béton	BT	BV	BC	BF	BVCF
Ciment	850	750	700	850	700
Sable de dunes	1200	1200	1200	1200	1200
chamotte	/	/	213	/	128
Fibres métalliques	/	/	/	165	165
Vase	/	170	/	/	128
Superplastifiant	39	39	39	39	39
Eau efficace	230	230	230	230	230
E/L	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Nomenclature :

- ✓ **BT** : béton témoin avec sable de dunes.
- ✓ **BC** : béton avec chamotte.
- ✓ **BV** : béton avec vase.
- ✓ **BF** : béton avec fibres métalliques.
- ✓ **BVCF** : béton avec vase, chamotte et fibres métalliques.

Toutes les formulations des BUHP étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques, et coulées dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires.

3.1 Séquence de malaxage

Tous les bétons sont mélangés dans un malaxeur à mortier à axe vertical de 10 litres, pour l'homogénéisation des poudres et la fluidification du mélange.

La séquence de malaxage, observée à ± 1 seconde près, est la suivante :

- ✓ introduction du ciment, de l'addition et des sables secs dans le malaxeur.
- ✓ malaxage des poudres à sec durant 2 minutes.
- ✓ introduction de l'eau et de la moitié du superplastifiant et malaxage durant 3 minutes,
- ✓ introduction de la seconde partie du superplastifiant, et malaxage jusqu'à fluidification (durée 5 minutes).
- ✓ introduction éventuelle des fibres, et malaxage final de 1 minute.

Cette séquence de malaxage est simple et permet une action efficace des adjuvants.

L'introduction des superplastifiants en deux temps augmente leur efficacité et permet ainsi de réduire la quantité à utiliser pour une fluidité donnée. Le premier ajout d'eau et de superplastifiant permet de mouiller la surface des constituants secs. Cependant, lors du contact entre l'eau et les particules fines, une partie de l'eau est absorbée à la surface des grains, ce qui a pour effet de réduire considérablement l'efficacité du superplastifiant. Une fois la surface des particules fines mouillée, le deuxième ajout de superplastifiant est beaucoup plus efficace car son action n'est pas diminuée par l'absorption. On peut ainsi obtenir une meilleure fluidification.

NB. Un changement dans la séquence de malaxage peut modifier grandement l'efficacité des superplastifiants. L'utilisation d'une séquence de malaxage différente peut donc conduire à des performances différentes. Cependant, la séquence de malaxage peut varier selon le rapport E/L, la quantité de ciment et d'ultrafines et l'efficacité du superplastifiant utilisé.

3.2 Mise en place des BUHP et modes de conservation

Les BUHP ont été mis en place par simple gravité dans les différents moules correspondant aux différents essais. Toutefois, les moules ont été secoués manuellement afin de faire remonter les bulles d'air emprisonnées dans le matériau. Il est à signaler qu'un temps d'attente trop long (supérieur à 30 minutes) entre la fabrication et le moulage peut entraîner une réduction importante de la maniabilité, rendant ainsi difficile la mise en place.

Les moules sont ensuite recouverts par un film plastique afin d'empêcher un départ excessif de l'eau libre du béton par évaporation. Ils sont ensuite conservés dans une salle à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sans échange d'humidité pendant 24 heures. Après démoulage les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à 20°C jusqu'à l'échéance d'essai (1, 7, 28 et 90 jours).

4. PROCEDURES EXPERIMENTALES

4.1 L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE

L'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5. Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette prismatique de béton posée à sa base sur de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés.

On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (jusqu'à 90 jours). A chaque échéance, l'éprouvette prismatique ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) séchée préalablement à l'étuve jusqu'à masse constante, est sortie du récipient, essuyée légèrement puis pesée (M_i) et replacée en position verticale.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré, par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_i - M_0}{S} \text{ (en g/mm}^2\text{)}$$

Avec :

M_i : masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes.

M_0 : masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

S: section de la base de l'éprouvette en millimètre carré.

4.2 L'ESSAI D'ABSORPTION PAR IMMERSION

L'absorption par immersion a été effectué, en séchant les éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) du béton à l'étuve jusqu'à masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l'eau pendant 24h à 20°C à la pression atmosphérique (c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau).

L'essai a pour but de déterminer la porosité accessible du béton. La porosité du béton est définie par la formule suivante :

$$\text{porosité} = \frac{M_a - M_s}{\gamma_w \times V} \times 100 (\%)$$

Avec :

M_a : masse d'éprouvette saturée d'eau ;

M_s : masse sèche de l'éprouvette ;

γ_w : masse volumique de l'eau ;

V: volume de l'éprouvette.

4.3 LE TRAITEMENT THERMIQUE

Le traitement thermique à la pression atmosphérique consiste à mettre le matériau en étuve (air chaud) ou en ambiance humide (vapeur d'eau et immersion) et à lui faire subir une élévation de température. Le taux d'augmentation de la température doit également être contrôlé (au maximum $20^\circ\text{C} / \text{h}$ selon Taylor [33]).

Dans cette étude, les éprouvettes ont été soumises, après 24 heures de cure à 20°C dans une chambre humide, à un cycle de traitement thermique à une température de 150°C pendant 3 jours selon le cycle de la Figure II.23.

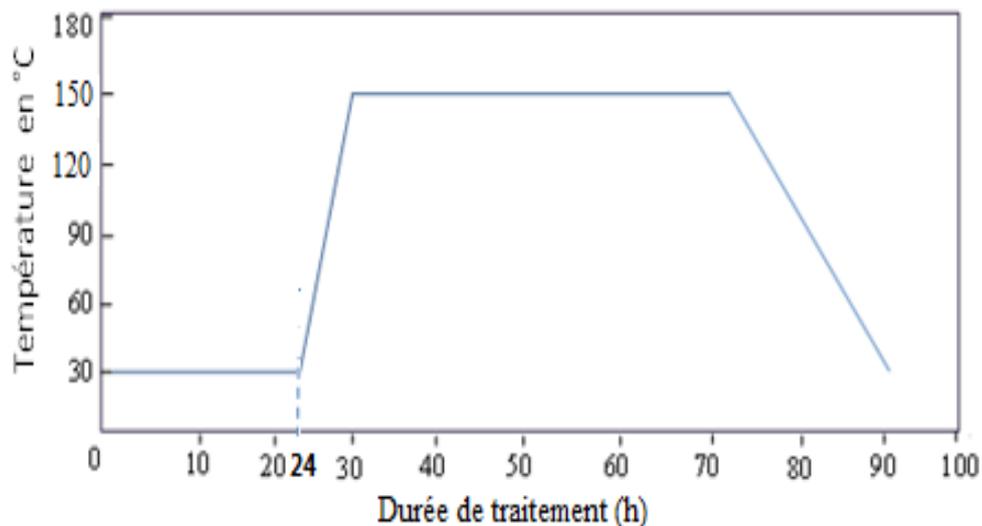


Figure II.23 : Cycle d'étuvage des BUHP.

Au départ, les éprouvettes sont mises dans une étuve à température minimale de 30°C pendant 24 heures afin de stabiliser toute la section des éprouvettes à cette température. Ensuite, la température est élevée à 150°C suivant une vitesse de 20°C/heure et maintenu pendant deux jours. On laisse ensuite les éprouvettes se refroidir naturellement dans l'étuve pendant un jour après l'avoir éteinte (Cette période permet au béton de revenir à une température ambiante sans risque de désordre au sein de l'élément).

4.4 TECHNIQUES DE CARACTERISATION STRUCTURALE ET MICROSTRUCTURALE

a. OBSERVATIONS AU MEB

La Microscopie Electronique à Balayage est fondée sur les interactions électrons-matière. Elle permet l'obtention d'images de hautes résolutions de la surface de l'échantillon avec des profondeurs de champs supérieures à la microscopie optique.

Les principaux éléments composant un Microscope Electronique à Balayage sont : une source d'électrons (canon) et un dispositif de haute tension, une colonne maintenue sous un vide secondaire, un ensemble de lentilles électroniques permettant l'obtention d'un fin faisceau, une platine permettant d'installer les échantillons, un détecteur d'électrons couplé à un amplificateur de signal et enfin un système de visualisation des images. Le fonctionnement du MEB est présenté dans la Figure II.24.

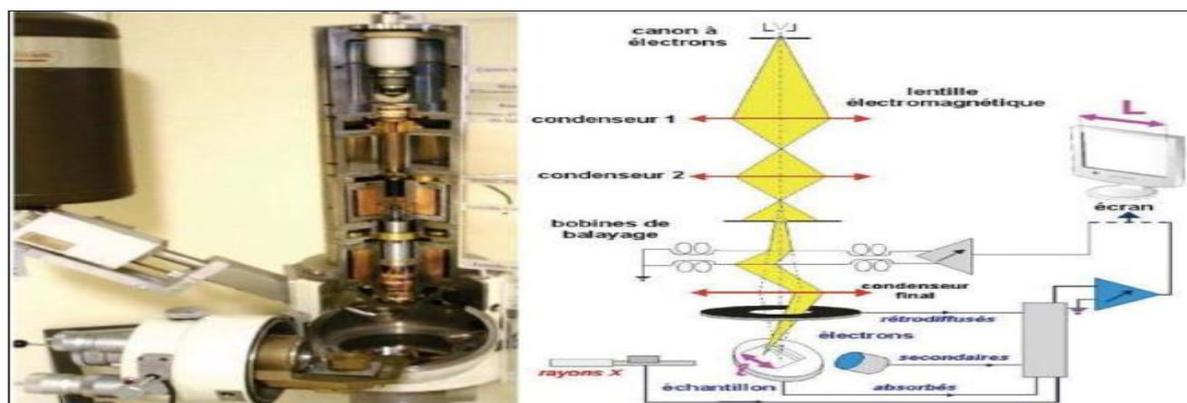


Figure II.24 : Photo de la coupe d'un MEB et schéma de fonctionnement associé [46].

Deux principes sont utilisés pour extraire les électrons : l'émission thermoïonique et l'émission par effet de champ. La première correspond à la technologie utilisée dans les microscopes à balayage traditionnels : la source des électrons est un filament de tungstène ou d'hexaborure de Lanthane (LaB6), chauffé par effet Joule. L'émission par effet de champ correspond à la technologie utilisée dans un MEB-FEG (acronyme anglais de Field Emission Gun). Dans ce dernier cas, il y a utilisation d'une cathode métallique très pointue. L'application d'une tension entre cette cathode et l'anode permet d'obtenir un champ électrique très intense grâce à un effet de pointe. Cette différence de technologie présente trois principaux avantages. Le MEB-FEG possède une plus grande stabilité lors de l'observation et une meilleure brillance (efficacité d'une source électronique). Sa source d'électrons a une durée de vie plus importante que celle du MEB.

Cette technique est généralement utilisée dans un Microscope Electronique à Balayage. Elle repose sur la sensibilité de certains capteurs au flux et à l'énergie des photons émis par l'échantillon observé.

Cette émission a été détaillée dans la section précédente. Les principaux composants nécessaires à cette technique sont : une source d'excitation (le faisceau d'électrons primaires émis par le MEB), un détecteur de rayons X, un processeur permettant l'enregistrement des impulsions et un système de stockage et d'analyse des signaux émis.

La morphologie des poudres et la microstructure des matériaux massifs fabriqués par frittage ont été observées à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Le principe de cette technique est basé sur l'interaction entre les électrons émis par un filament de tungstène et la surface de l'échantillon. L'analyse de l'intensité des électrons secondaires permet de reconstituer la morphologie de la surface observée.

b. ANALYSES PAR DIFFRACTION RX

La diffractométrie de rayons X (DRX, ou encore XRD en anglais pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière ; on la classe dans les méthodes d'analyse physico-chimique. Elle est principalement utilisée pour caractériser l'organisation atomique de la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés).

Elle permet de distinguer des produits ayant la même composition chimique brute mais une forme cristallographique différente comme les différentes formes de silice SiO_2 (quartz, cristobalite, etc...), les différents aciers (ferritique, austénitique, etc...) ou encore les différentes alumines (corindon, alumine α , γ , δ , θ , etc...).

L'échantillon est préparé sous la forme d'une poudre aplaniée dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une fine plaquette solide (massif). Des rayons X générés par une source sont dirigés sur la surface incidente de cet échantillon ; un détecteur permet la mesure de l'intensité des rayons X selon la direction.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de distinguer les différentes formes de cristallisation d'un même composé. La procédure d'identification des phases se fait en deux étapes : une étape de recherche dans une base (search), puis une confrontation des fiches probables avec ce qui est possible chimiquement (match) ; on parle donc fréquemment de search/match pour désigner cette procédure [47]. Les études par diffraction des rayons X ont été réalisées au laboratoire de géomatériaux (université de chlef) sur un diffractomètre D8 Discover de Bruker AXS (figure II.25, Il s'agit d'un diffractomètre de Bragg-Brentano (montage $\theta - \theta$) :

La source et le détecteur sont en rotation symétrique, à la même vitesse, autour de l'échantillon. Par ailleurs le porte échantillon peut effectuer une rotation perpendiculairement à son plan (autour de la verticale) : cela conduit à une meilleure distribution statistique des grains face au faisceau X.

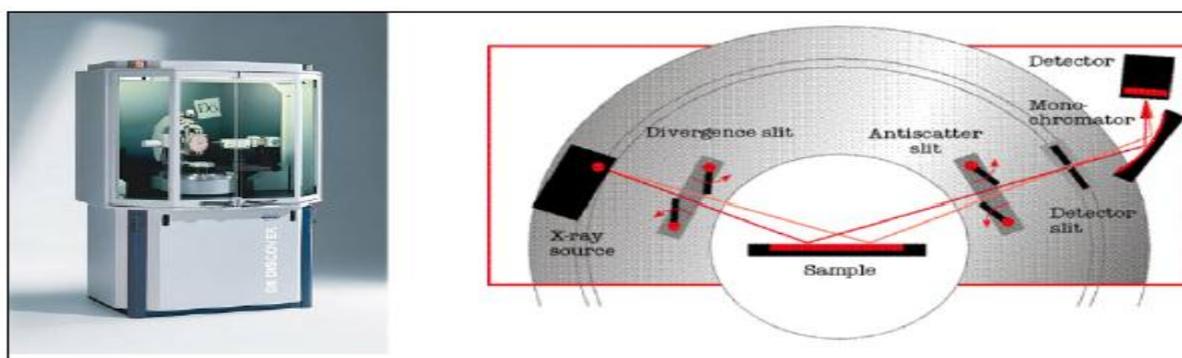


Figure II.25 : Géométrie du diffractomètre D8 Discover-Documentation Bruker [47].

c. ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE

L'analyse thermique est effectuée à l'aide d'un appareil type STA 409 PC de NETSCZH avec une vitesse de montée en température de 10 °C/min. Cet appareil nous permet de faire L'ATD et l'ATG simultanément. L'un des avantages du couplage de l'ATD/ATG est la simultanéité des mesures sur le même échantillon, avec un contrôle effectif du temps et de la température.

Le principe de l'Analyse Thermique Différentielle (ATD) consiste à suivre l'évolution de la différence de température (ΔT) entre l'échantillon étudié et un corps témoin inerte c'est-à-dire dépourvu d'effets thermiques dans le domaine de température étudié. En dehors de l'aspect d'identification des espèces, l'ATD est utile dans l'étude des comportements des minéraux vis-à-vis de la chaleur.

Il est donc possible de suivre l'influence de la température sur les pertes de masse de la matière étudiée. Ceci constitue le principe de l'analyse thermogravimétrique. La pesée continue des substances peut se faire pendant une variation linéaire de la température en fonction du temps. Lorsque la température des substances en réaction est maintenue constante, on passe au cas limite de la thermogravimétrie isotherme. L'analyse Thermo-Gravimétrique (ATG) consiste donc à déterminer en fonction de la température les quantités de constituants volatils adsorbés ou combinés dans la matière. Les valeurs de température correspondant aux pertes de masses apportent des informations complémentaires à celles obtenues par ATD. Tout changement de phases, cristallisation ou réaction chimique qui consomme ou libère de la chaleur au sein de l'échantillon, fait apparaître une différence entre la température de celui-ci et celle de la référence. Cette différence atteint son maximum lorsque la vitesse de consommation ou de libération de la chaleur par l'échantillon cesse d'être supérieure à la vitesse d'échange de chaleur entre cet échantillon et son environnement [46].



Figure II.26 : Photographie du dispositif ATD-ATG couplé.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents matériaux utilisés dans la formulation des bétons d'étude suivant les normes respectives, dans l'opportunité de réaliser la compatibilité de ces matériaux pour ce genre de béton.

Cependant, les conclusions qu'on peut tirer de la caractérisation de ces matériaux sont :

- Le ciment utilisé est le CPJ de classe 42,5 de poids spécifique inférieur à la moyenne habituelle, avec une finesse et une prise satisfaisante aux spécifications des ciments courants.
- Pour le sable de dune (région d'Ain El-Beida), il se caractérise par une granulométrie serrée, une bonne propreté et un taux d'absorption d'eau considérable.

En ce qui concerne la composition du béton on a présenté une méthode couramment utilisée, c'est la méthode dite « empirique », cinq compositions à base de sable de dunes ont été mises au point, avec ou sans de chamotte ou de vase de barrage et des fibres métalliques.

*Résultats Expérimentaux
et Interprétations*

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

1. INTRODUCTION

L'incorporation des ajouts minéraux est maintenant une technique importante pour améliorer les propriétés du béton telle que la résistance, la durabilité, etc. Ces additions affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance et la durabilité des matériaux durcis. Les formulations des bétons résultent essentiellement d'une approche empirique basée sur des tâtonnements en laboratoire et de ce fait, plusieurs échecs ont été écartés lors de la mise en œuvre de ces bétons sur chantier.

Après avoir établi dans la synthèse bibliographique le bilan des recherches sur la caractérisation à l'état frais et durci des bétons BFUP, ainsi que les caractéristiques des matériaux utilisées au chapitre précédent, nous menons dans cette partie expérimentale la caractérisation des bétons d'étude.

2. BETONS A L'ETAT FRAIS

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des broyées (la vase et la chamotte) et calcinées comme addition au BUHP entraîne une diminution de l'étalement. Il est de même pour l'ouvrabilité et le seuil de viscosité de la pâte dues vraisemblablement à la finesse de l'addition ($\varnothing < 80\mu\text{m}$).

Les BFUP étudiés ont un comportement rhéologique semblable à celui décrit par Bonneau [2]. Ce sont des matériaux faciles à mouler et bien adaptés à la préfabrication. On peut les utiliser pour produire des formes de complexité variée et obtenir une excellente reproduction des détails grâce à leur fluidité et à leur qualité de surface sans bullage.

2.1 L'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, car le plus facile à mettre en œuvre, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide d'un cône à mortier (cône d'Abrams) selon les recommandations de l'Association Française de Génie Civil. En effet, la

valeur de l'étalement, donnée par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement dans le cas des bétons se mettant en place par simple gravité (type béton autoplaçant).

Cet essai permet de surveiller aussi visuellement la ségrégation du béton. On doit ainsi s'assurer de l'absence d'auréole de laitance en périphérie de la galette et d'amas de granulats en son centre.

Les résultats obtenus (Tableau III.1) montrent que l'incorporation de la vase et la chamotte broyées et calcinées comme addition au BUHP à entraîné une diminution de l'ouvrabilité à la finesse de l'addition ($\varnothing < 80\mu\text{m}$), alors pour garder une même fluidité et éviter cette diminution de l'ouvrabilité, on peut augmenter le dosage en superplastifiant jusqu'à son point de saturation.

Tableau III.1 : Etalement des différents bétons.

Type de béton	BT	BV	BC	BF	BVCF
Etalement en cm	49,75	39,25	38	36	38,50

Cependant, la valeur de l'étalement reste dans l'intervalle préconisé par le cahier des charges (36 à 50 cm). On s'aperçoit dans la Figure III.1 que les fibres diminuent l'étalement du béton et c'est pour cela que l'ajout d'un superplastifiant est nécessaire.

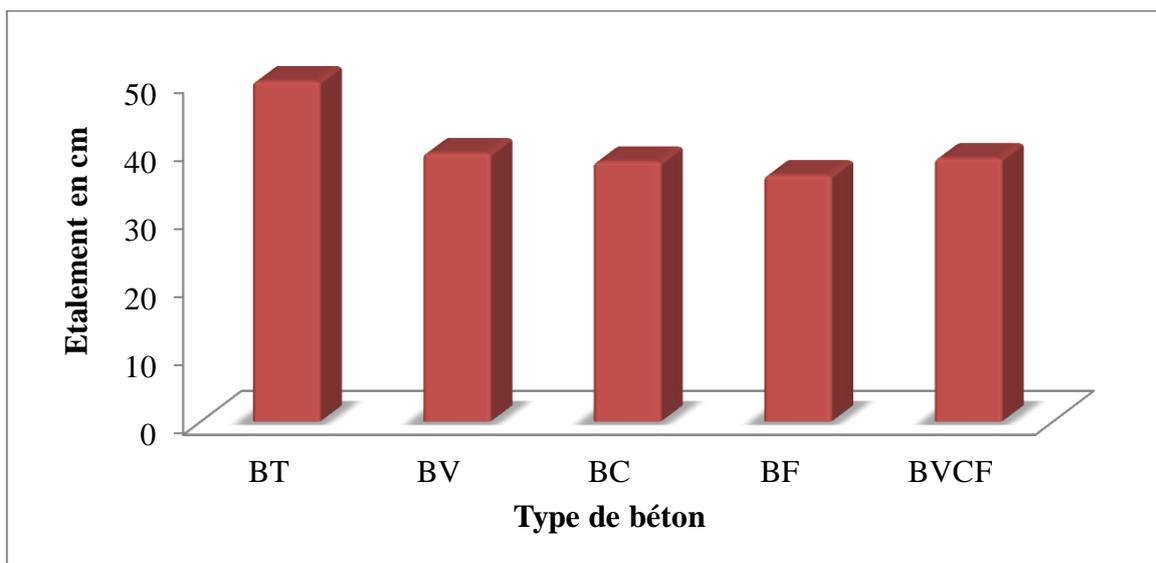


Figure III.1 : Evolution de l'étalement pour les différents bétons.

2.2 L'AIR OCCLUS

La mesure de l'air occlus a été effectuée au moyen d'un aéromètre de huit litres modèle « CONTROLS ». Les valeurs des teneurs en air occlus de l'ensemble de nos bétons sont données dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 : Valeurs des teneurs en air occlus des différents bétons.

Type de béton	BT	BV	BC	BF	BVCF
Teneur en air occlus (%)	1,70	1,85	2,05	2,30	2,18

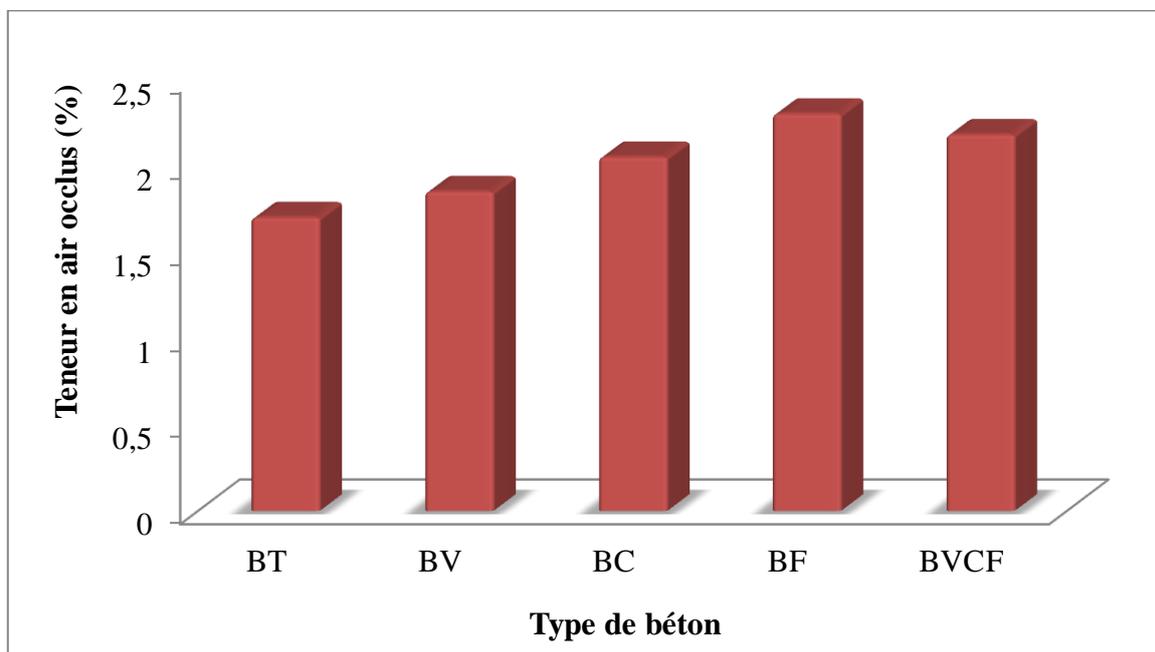


Figure III.2 : Variation de la teneur en air occlus des différents bétons.

La quantité d'air occlus des cinq formulations étudiées à l'état frais est comprise entre 1,85 % et 2,40 %. On constate que le pourcentage d'air occlus est pratiquement presque le même pour tous les bétons testés sauf pour le béton fibré. Ceci s'explique par la forme et la dimension des fibres métalliques utilisées, lesquels augmentent les vides à l'intérieur de la matrice (3%) [22] et du BPR200 de Roux et al (1%) [36].

2.3 MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique réelle du béton frais est mesurée par pesée du récipient de 8 litres (récipient de l'aéromètre à béton). Les mesures de la masse volumique réelle du béton frais sont données dans le Tableau III.3.

La densité est calculée par la formule suivante :

$$\rho = (P - P_0)/V$$

Avec :

P : Masse du récipient plein de béton ;

P₀ : Masse du récipient vide ;

ρ : Masse volumique du béton frais ;

V : Volume du récipient.

Tableau III.3 : Masse volumique réelle du béton frais.

Type de béton	BT	BV	BC	BF	BVCF
La densité (kg/m ³)	2383	2395	2399	2403	2408

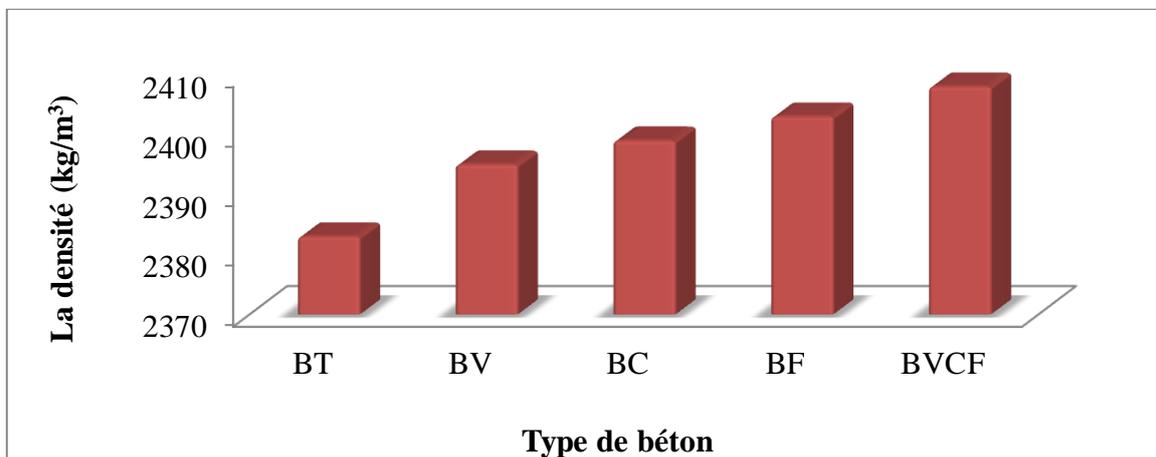


Figure III.3 : Variation de la masse volumique réelle à l'état frais des différents bétons.

L'introduction des additions (la vase et la chamotte) entraîne une modification de la densité de la matrice cimentaire. La masse volumique pour le béton témoin BT est plus faible par rapport aux autres bétons (BV, BC, BF, BVCF). Suite à leur densité élevée, l'introduction des fibres métalliques augmente la masse volumique du béton [48].

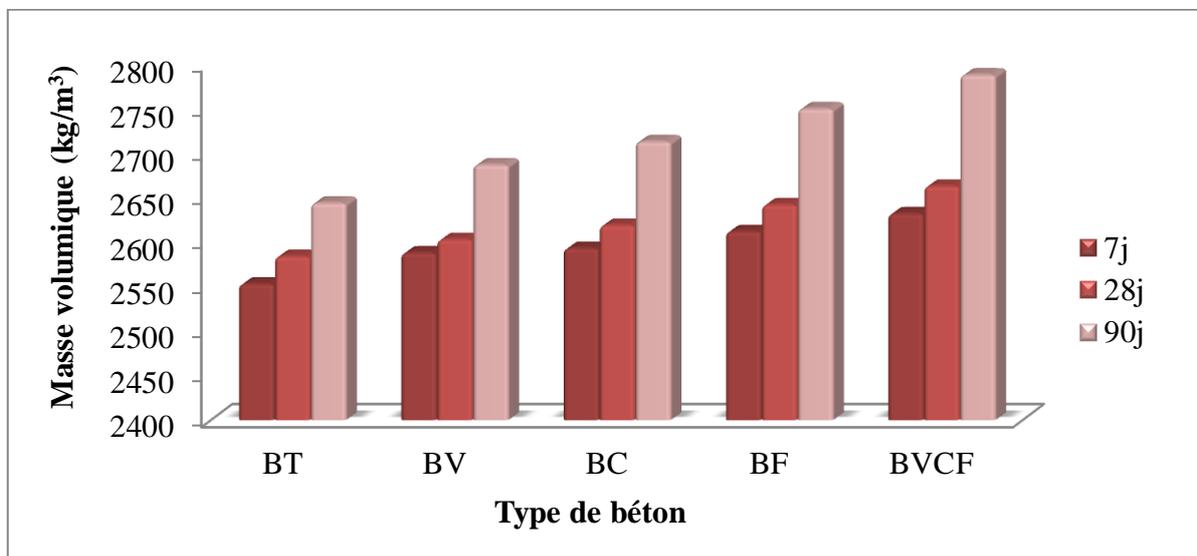
3. BETONS A L'ETAT DURCI

3.1 MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique du béton durci est la masse de l'éprouvette (11x22 cm³) par son volume. Les masses volumiques sont mesurées à 7, 28 et 90 jours, les résultats sont comme suit (Tableau III.4) :

Tableau III.4 : Masse volumique (en kg/m³).

Type de béton \ Temps	7j	28j	90j
BT	2553	2584	2644
BV	2588	2603	2687
BC	2593	2619	2713
BF	2612	2642	2750
BVCF	2632	2663	2788

**Figure III.4** : Variation de la masse volumique à l'état durci des différents bétons.

La masse volumique augmente avec l'incorporation des additions et introduction des fibres. Cependant elle reste à peu près dans le même ordre pour les différents âges. Elle reste supérieure à celles du béton témoin [6].

3.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION

L'essai consiste à rompre des éprouvettes cylindriques de dimensions (11x22 cm³), entre les plateaux d'une presse hydraulique (MATEST CE 06).

Les essais effectués sur les bétons à différents âges (7, 28 et 90) jours sont donnés présentés dans le tableau III.5 suivant :

Tableau III.5: Résistance à la compression des différents bétons (en MPa).

Temps Type de béton	7j	28j	90j
BT	40,25	73,30	117,75
BV	62,20	94,40	140,55
BC	81,75	118,20	151,20
BF	98,10	147,15	192,50
BVCF	91,90	139,25	181,25

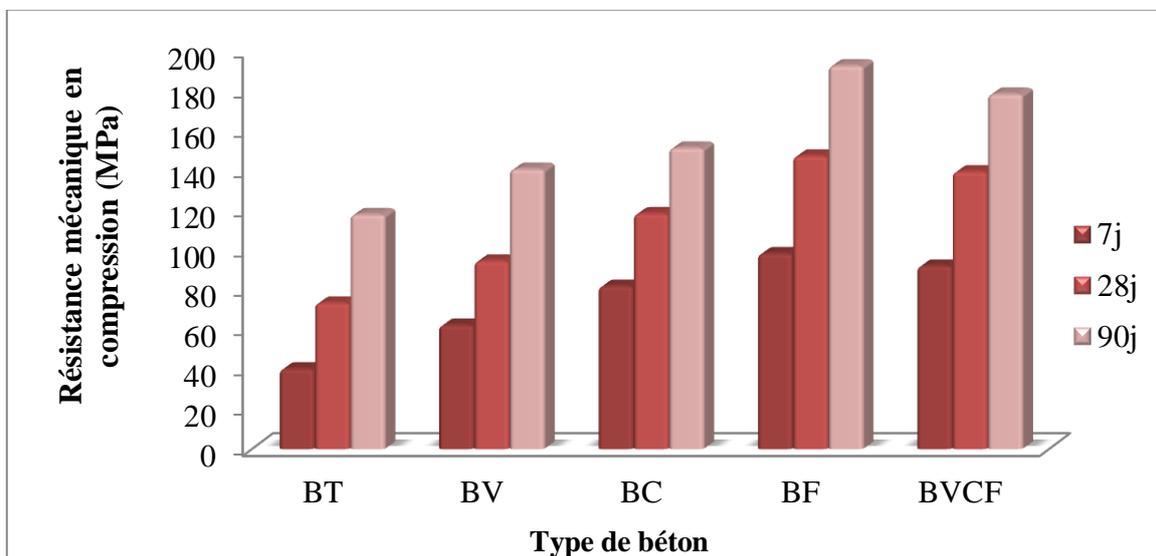


Figure III.5 : Résistance mécanique en compression des différents bétons.

La figure III.5 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les BFUHP étudiés. On remarque que les résistances mécaniques à la compression du béton avec additions sont plus grandes que celle du béton témoin [49]. Cela peut être expliqué par le fait que les additions agissent sur les réactions d'hydratation des grains de ciment préalablement bien dispersés, modifiant leurs vitesse de croissance et par la suite leurs morphologie.

3.3 TRACTION PAR FLEXION

Cet essai permet de reproduire le type de sollicitation en traction le plus fréquent dans les ouvrages « la flexion ». Le tableau III.7 présente les résultats obtenus. Le dispositif utilisé est

un dispositif de flexion 3 points. La résistance à la traction est obtenue en appliquant la formule de la résistance des matériaux :

$$R_f = 3F.l / 2b.h^2$$

R_f : Résistance à la traction par flexion (MPa).

F : Force appliquée (N).

l : Longueur entre les appuis (mm).

b : Largeur d'éprouvette (mm).

h : Hauteur d'éprouvette (mm).



Figure III.6 : Essai de traction par flexion 3 points.

Tableau III.6 : Résistance à la traction par flexion des différents bétons (en MPa).

Temps Type de béton	7j	28j	90j
BT	9,75	16,50	25,75
BV	17,75	28,75	35,10
BC	26,25	35,50	40,10
BF	37,00	46,50	51,00
BVCF	30,25	41,25	46,50

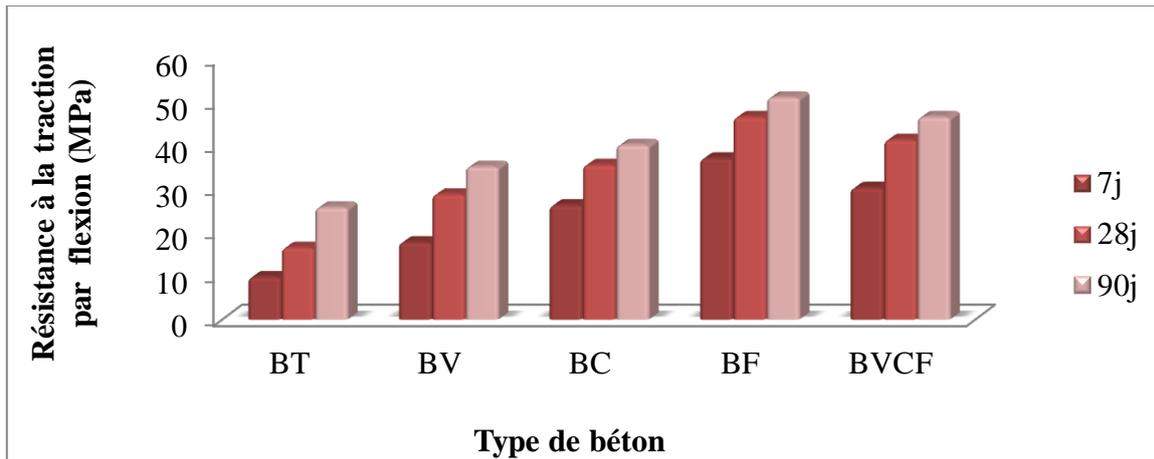


Figure III.7 : Résistance en traction par flexion.

Sur la figure III.7, on constate que l'addition de vase et de chamotte entraîne une amélioration de la résistance à la traction par flexion. Certains chercheurs Sibi [50] attribuent la haute réactivité initiale de la chamotte dont la phase (Al_2O_3) favorise la formation de silicate d'alumine hydraté (C_2ASH_8 , ou gehlénite hydratée, ou strätlingite).

La présence de fibres dans le béton freine la fissuration, après application d'une charge maximale et empêche ainsi le scindement des éprouvettes grâce à leur haute résistance à la traction et la bonne adhérence fibre-matrice (plus perceptible dans la flexion) comme décrit par Malier et al. [51]. Ces résultats confirment les tendances observées par Bonneau [2] et Taфраoui A. [6].

3.4 RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE

Cet essai, appelé aussi essai Brésilien, consiste à écraser un cylindre de béton ($16 \times 32 \text{ cm}^3$) suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices.

La résistance à la traction f_{tj} est définie par la relation suivante :

$$f_{tj} = \frac{2P}{\pi DL}$$

Avec :

P : Charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamètre vertical ;

D : Diamètre du cylindre ;

L : Longueur du cylindre ;

j : Âge de béton au moment de l'écrasement (en jours).



Figure III.8 : Eprouvette de l'essai de traction par fendage.

Les résultats de traction par fendage correspondant à la valeur moyenne de 3 essais sont présentés dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Résistance à la traction par fendage des différents bétons (en MPa).

Temps Type de béton	7j	28j	90j
BT	11,75	19,50	27,00
BV	19,75	28,75	36,50
BC	25,25	39,50	42,10
BF	36,50	51,50	59,25
BVCF	31,25	45,25	52,50

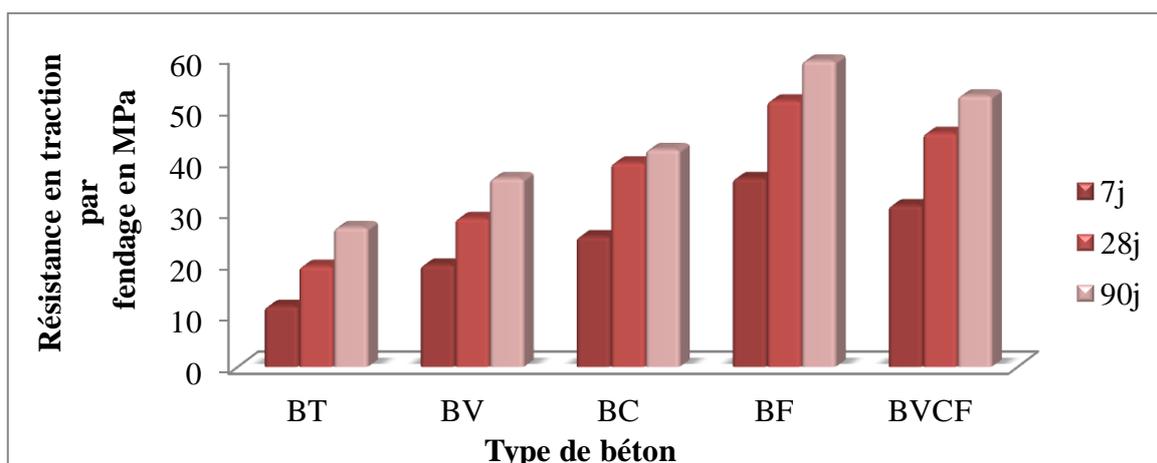


Figure III.9 : Evolution de la résistance en traction par fendage des différents bétons.

On constate que les résistances mécaniques à la traction par fendage sont améliorées avec l'utilisation des fibres particulièrement pour les autres bétons (BT, BV, BC, BVCF) en raison

de la meilleure adhérence fibre-matrice. C'est-à-dire une grande compacité et par conséquent une résistance mécanique élevée. Mais aussi les fines particules des additions ont un effet physique, qui comble les vides dans la matrice et donnent une bonne compacité.

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que l'ajout de chamotte influe positivement sur le comportement mécanique des bétons BFUP, donc il peut être valorisé sur le plan mécanique.

3.5 RETRAIT TOTAL

Cet essai a pour but de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes à l'état durci, dues aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires, conservés après démoulage dans une salle à atmosphère contrôlée, température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 \pm 5\%$ et en absence de vent.



Figure III.10 : Rétractomètre et éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$.

Pour mesurer le retrait total, des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) sont utilisées. On compare, à différents temps, la variation de longueur des éprouvettes par rapport à leur longueur initiale au temps t_0 pris pour origine, à différents âges (7, 28 et 90) jours.

Tableau III.8: Retraits des différents bétons.

Temps Type de béton	7j	28j	90j
BT	575	656	725
BV	296	336	405
BC	386	451	538
BF	483	522	602
BVCF	385	446	530

D'après les résultats présentés sur la figure III.11, nous constatons que les fibres métalliques diminuent le retrait ; par rapport au béton sans fibres (témoin). L'introduction de 1,5% de fibres métalliques par rapport au volume du béton a un effet significatif vis-à-vis du retrait [52,53 et 54], qui ont noté les bétons avec chamotte conduisent à un retrait plus élevé que ceux avec vase. Dans l'ensemble, les valeurs obtenues sont un peu diminuées par rapport à celle du béton témoin.

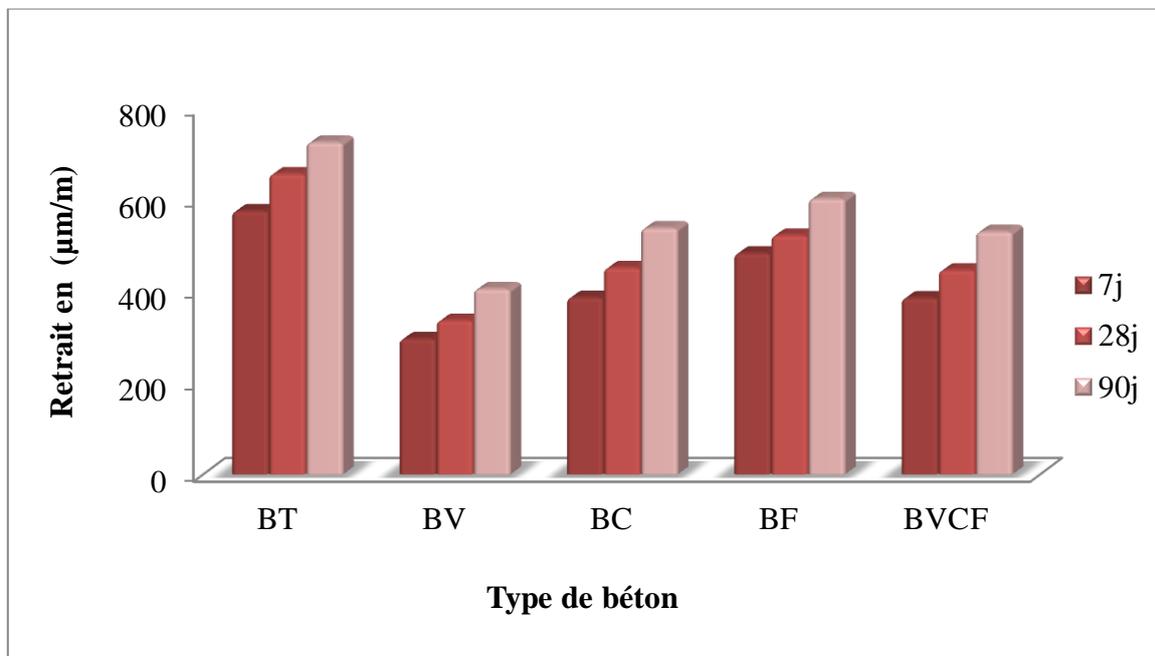


Figure III.11 : Retrait des bétons à différentes échéances.

3.6 ABSORPTION D'EAU

On remarque que le coefficient d'absorption d'eau (Figure III.12) augmente nettement avec la présence des fibres métalliques. Ainsi l'introduction des fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus au moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau. Alors que les ajouts de chamotte et la vase finement broyé densifie la matrice et par conséquent le degré d'absorption d'eau est diminué, Les valeurs de l'absorption d'eau obtenues sont en accord avec Tafraoui, A et Roux et al. [6, 36].

Tableau III.9 : Coefficient d'absorption d'eaux de bétons (en %).

Type du béton	28j	90j
BT	5,25	2,83
BV	3,93	2,20
BC	3,77	1,84
BF	6,22	3,21
BVCF	5,62	2,99

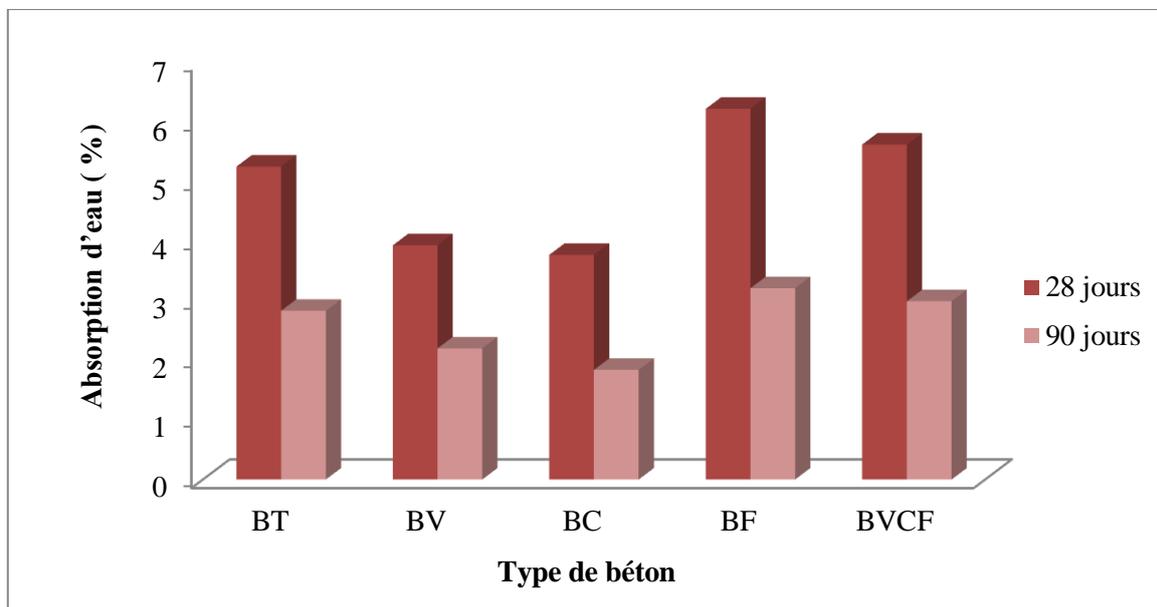


Figure III.12 : Coefficient d'absorption d'eau des différents bétons durcis.

4. INDICATEURS DE DURABILITE

Dans cette section, nous allons décrire les essais réalisés pour quantifier certaines propriétés de transfert souvent retenues comme indicateurs de durabilité des matériaux cimentaires.

La porosité est un paramètre important qui régit le comportement mécanique du béton mais aussi sa durabilité. Elle se caractérise de manière globale par des mesures de porosité accessible à l'eau et par la distribution de taille de pores grâce à des essais de porosité par intrusion de mercure. Les essais de durabilité, comme l'absorption d'eau par capillarité, permettent de fournir des informations complémentaires sur la connectivité des pores, sur la tortuosité, etc.

4.1 ABSORPTION CAPILLAIRE

Les essais d'absorption capillaire sont également intéressants et faciles à effectuer. Ils renseignent globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Ils sont aussi utilisés en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton.

Tableau III.10 : Absorption d'eau par capillarité pour les différents types de béton en (%).

Type du béton \ Temps (jours)	BT	BV	BC	BF	BVCF
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,10	0,56	0,93	1,38	1,13
20	1,18	0,73	1,03	1,46	1,20
30	1,23	0,84	1,07	1,53	1,31
40	1,39	0,95	1,17	1,60	1,41
50	1,45	1,02	1,21	1,71	1,62
60	1,51	1,13	1,38	1,77	1,71
70	1,63	1,35	1,42	1,83	1,80
80	1,72	1,41	1,49	1,90	1,91
90	1,81	1,50	1,58	2,01	1,94

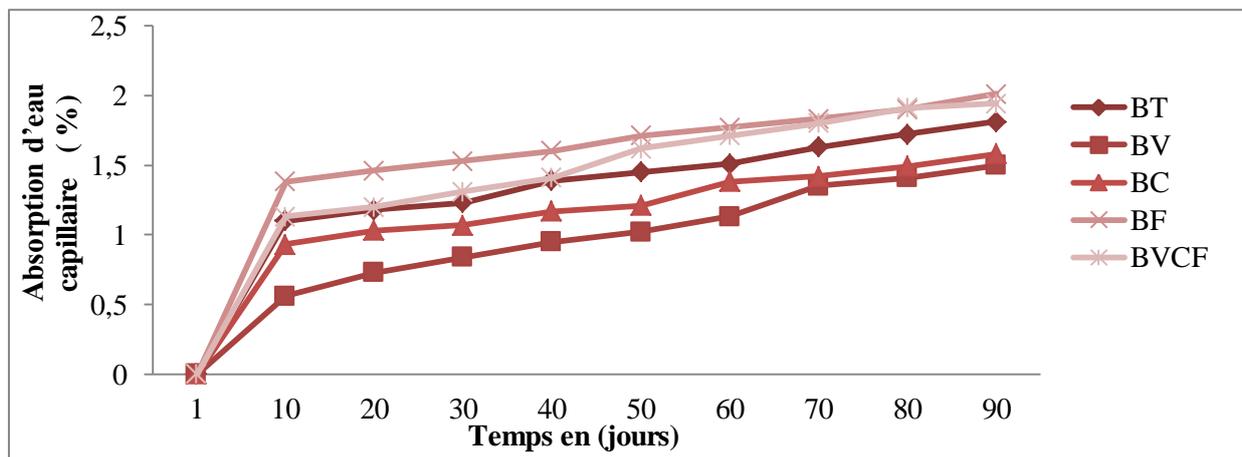


Figure III.13 : Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des bétons à différentes échéances.

L'influence des ajouts minéraux (la vase et la chamotte) sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur la figure III.13. Les valeurs de cette figure montrent une augmentation de l'absorption avec le temps (jusqu'à 90 jours), et ce pour tous les mélanges.

On remarque que le mélange à base de la vase est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit. Par contre, pour les bétons fibrés l'absorption capillaire augmente. D'où on peut conclure que plus la compacité est élevée plus l'absorption capillaire est faible donc la finesse des ajouts minéraux à une influence directe sur ce paramètre. Nos résultats d'absorption capillaire s'approchent de ceux donnés par Roux et al [36].

4.2 ABSORPTION PAR IMMERSION

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage par rapport à la masse sèche. Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque type du béton sont exprimés sont donnés sur le tableau III.11.

Tableau III.11 : Absorption d'eau par immersion pour les différents types de bétons (en %).

Type du béton \ Temps (jours)	BT	BV	BC	BF	BVCF
1 heure	1,03	0,99	1,00	1,20	1,12
1 jour	2,03	1,74	1,80	2,12	2,09
15 jours	3,70	2,65	2,71	4,12	4,08
30 jours	3,98	2,91	3,63	4,98	4,82
90 jours	4,48	3,26	3,76	5,32	5,02

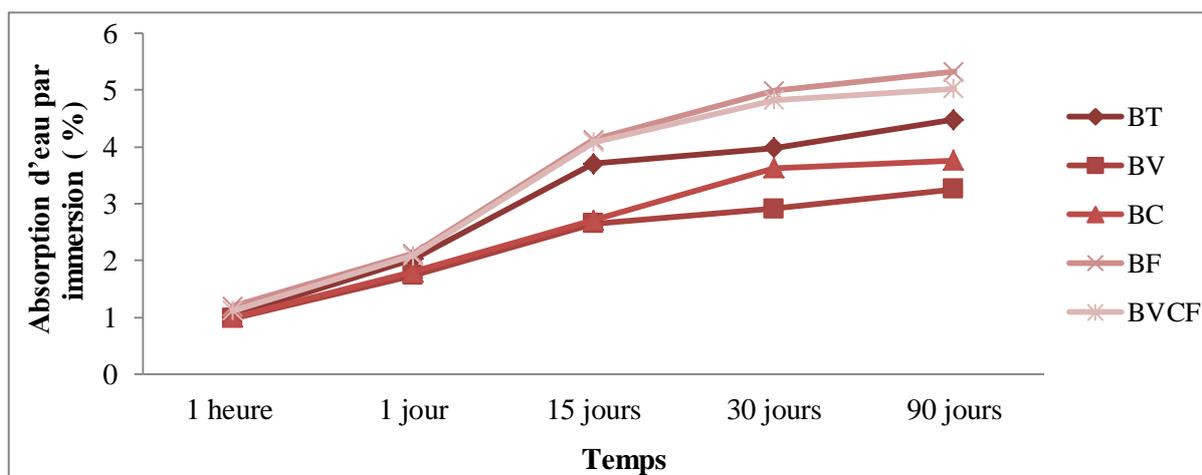


Figure III.14 : Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des différents types de béton.

Les résultats obtenus montrent l'effet favorable de la combinaison de la vase avec la chamotte sur l'absorption par immersion pour le cas du BVCF. La tendance à la diminution de l'absorption par immersion est fonction du type d'addition.

On remarque aussi que l'ajout de fibres métalliques influe de manière néfaste sur l'absorption des bétons Roux et al [36].

5. PATE DE CIMENT DURCI

Nous avons vu dans les essais précédents que les propriétés des BFUP étaient globalement maintenues, voire améliorées, lorsque nous avons utilisé le sable de dunes et les additions « chamotte et la vase ». Les essais décrits ci-dessous ont été effectués sur les pâtes caractéristiques des deux formules de béton (béton avec la vase et la chamotte). La confection des deux pâtes respecte donc les proportions massiques de ciment, d'addition ultrafine, d'eau, et de superplastifiant des BFUP (vase et chamotte). De plus, pour une même composition, nous avons constaté que les propriétés étaient améliorées par un traitement thermique et plus particulièrement celui à 150°C.

Si ces propriétés sont maintenues ou améliorées, toute chose étant égale par ailleurs, c'est certainement parce que la microstructure du matériau est aussi améliorée. Ce sont ces modifications de microstructure que nous allons chercher maintenant à mettre en évidence dans cette partie d'étude.

Nous avons donc étudié par diffraction des rayons X et par microscopie électronique à balayage les propriétés microstructurales de certains BUHP (non fibrés) en fonction des conditions de traitement thermique, de sable fin et du type d'addition. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

5.1 ANALYSE PAR DIFFRACTION DES RAYONS X

La figure III.15 présente le diffractogramme de rayons X des BUHP à base de sable de dunes et de chamotte et de vase à 28 jours sans traitement thermique.

Ces diffractogrammes mettent essentiellement en évidence, en plus du quartz qui est le constituant principal de la phase granulaire, les phases anhydres du ciment, à savoir le C_3S et le C_2S . L'ettringite est uniquement dans le cas des BUHP non traités thermiquement. Il est à noter que la portlandite est plus visible dans le mélange avec chamotte, ce qui pourrait expliquer les performances supérieures de cette dernière addition, la portlandite ayant

certainement été transformée en C-S-H. Enfin, aucun hydrate à l'origine des résistances n'est mis en évidence mais ceci est à relier au caractère « amorphe » de ces derniers (non visibles par DRX) conformément à Wild, S., et al [55].

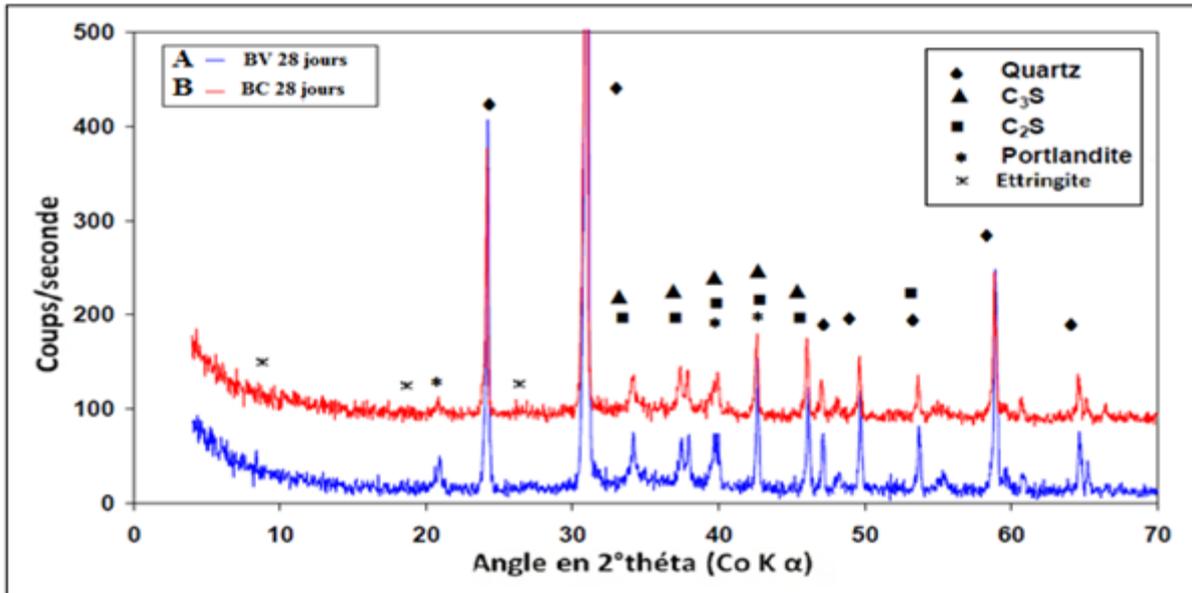


Figure III.15 : Diffractogramme X de BUHP avec la vase (A), chamotte (B), à 28 jours sans traitement thermique.

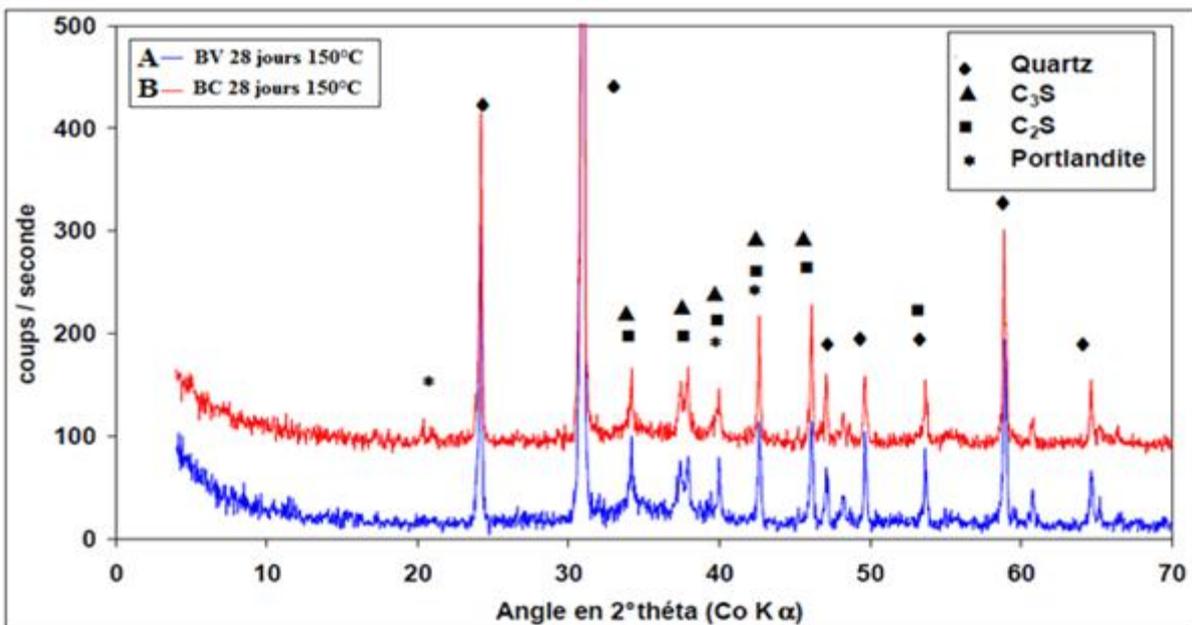


Figure III.16 : Diffractogramme X de BUHP avec la vase (A), chamotte (B), après un traitement thermique à 150°C.

Du point de vue du traitement thermique, le seul changement observé est des raies de portlandite diminue traduisant leur consommation par les réactions pouzzolaniques avec la vase. La portlandite étant stable à la température du traitement (150°C), sa diminution, ne peut provenir que de la réaction pouzzolanique accélérée par la température.

Nous chercherons à confirmer avec les autres méthodes d'analyses si, comme semble l'indiquer cette observation par DRX, la chamotte consomme moins de portlandite que la vase dans nos pâtes. Comme pour la pâte avec la vase, les raies d'ettringite évoluent peu au cours du temps. Enfin, contrairement aux hypothèses de Wild, S., et al [55]. La portlandite étant stable à la température du traitement (150°C), sa disparition, partielle ou totale, ne peut provenir que de la réaction pouzzolanique accélérée par la température. Ainsi, la réaction avec la température semble plus favorable avec la vase.

5.2 OBSERVATIONS AU MEB

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été effectuées sur les échantillons après sciage et polissage afin de mettre en évidence les différentes phases minéralogiques. Ainsi, les observations ont été faites en mode « électrons rétrodiffusés » pour mieux mettre en évidence les différents constituants hydratés.

Les Figures III.17, III.18 et III.19 présentent une vue globale de la microstructure des différents BUHP étudiés. Elles mettent en évidence les phases granulaires en gris sombre, les phases anhydres du clinker en gris très clair, et les phases hydratées en gris moyen.

On constate que le nombre de grains de ciment anhydres est encore très important, que l'observation soit faite après 28 jours sans traitement thermique, ou après le traitement thermique (à 150°C). En l'absence de traitement des images, il n'est cependant pas possible de conclure sur le degré d'hydratation des différents BUHP.

Apparemment la pâte est plus bien compacte sans nuances de gris, ceci pouvant être associés à des différences d'hydrates.

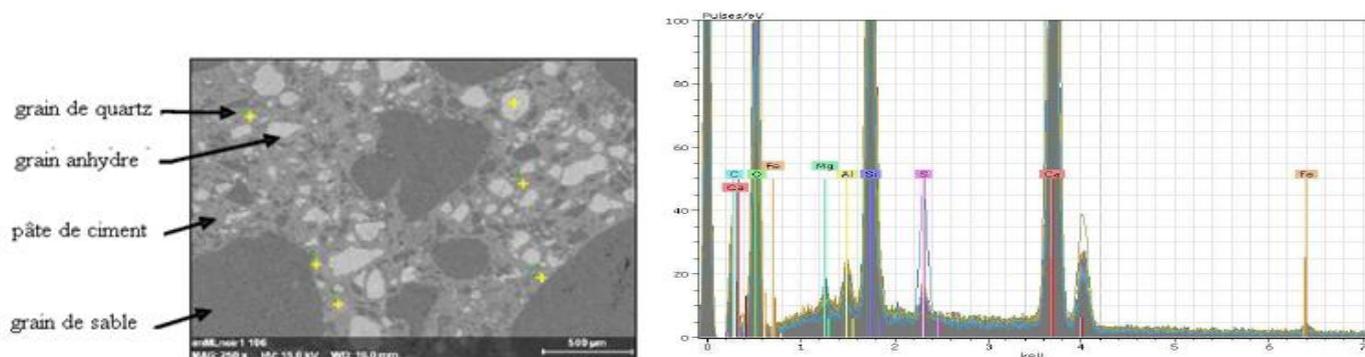


Figure III.17 : Image MEB (x250) et analyse EDS du BUHP avec la vase à 28 jours.

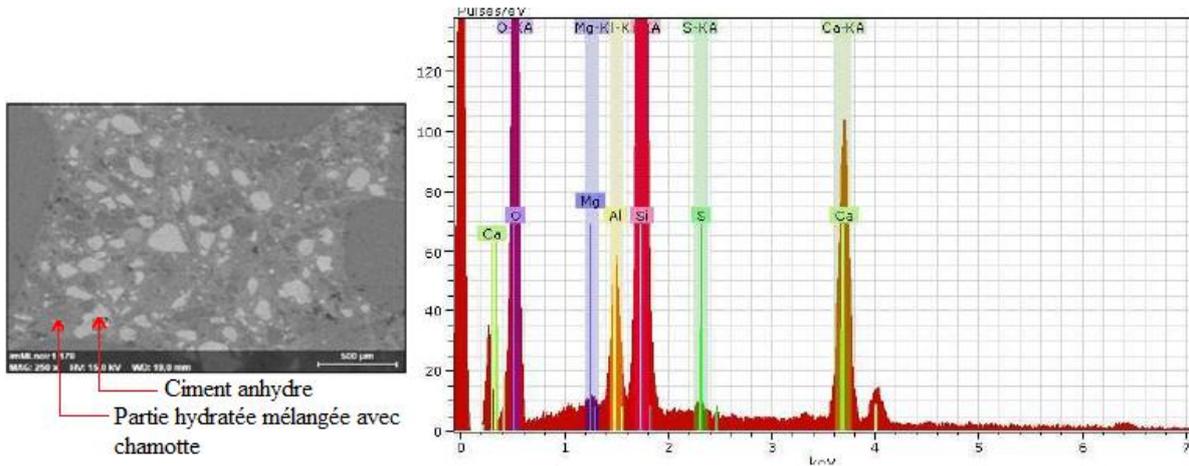


Figure III.18 : Image MEB (x250) et analyse EDS du BUHP avec la chamotte à 28 jours.

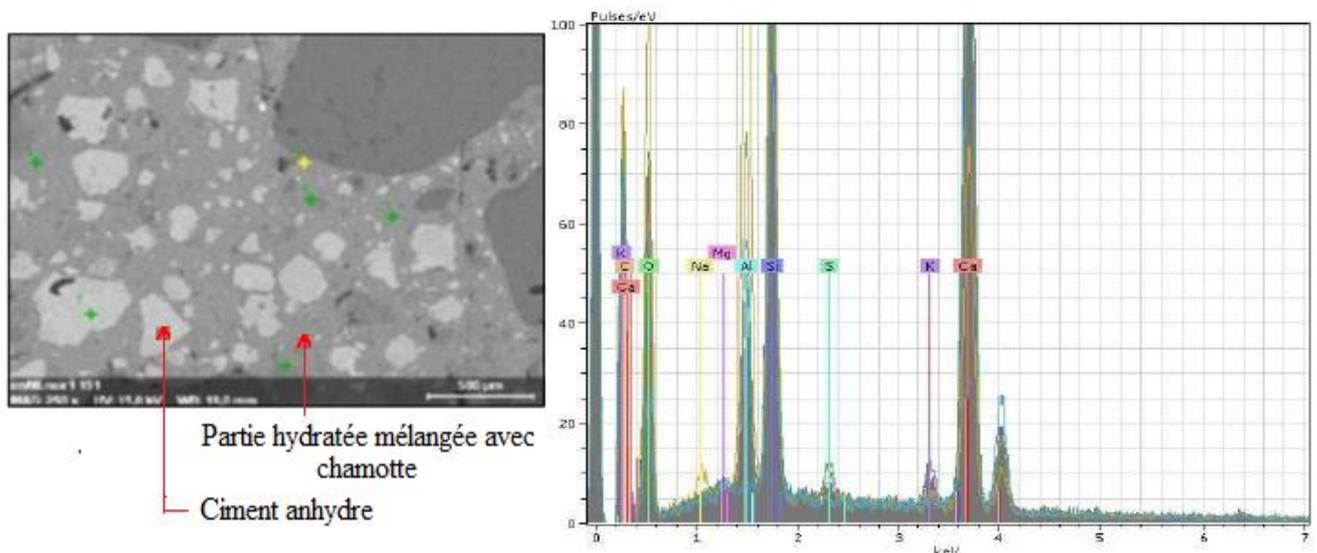


Figure III.19 : Image MEB (x250) et analyse EDS du BUHP avec la chamotte et la vase à 28 jours.

Pour mettre en évidence des différentes phases constituantes les pâtes de BUHP, selon le type d'addition et le traitement thermique, des analyses ponctuelles EDS ont été effectuées en prenant soin de n'analyser que la pâte de ciment. Ainsi, par échantillon, plus d'une cinquantaine d'analyses élémentaires ont été réalisées.

Les analyses EDS montrent des légères différences entre les pâtes selon la nature de l'addition. Ceci est directement lié à la composition chimique de l'addition, uniquement composée de silice pour la vase ou comportant aussi de l'alumine pour la chamotte.

De plus, comme la « poire d'analyse » peut recouvrir plusieurs hydrates, nous traitons ces résultats en rapport élémentaire et ainsi, on s'affranchit des problématiques de bouclage à 100% ainsi que de degré d'oxydation.

La Figure III.18 montre un exemple des photos prises durant l'observation au MEB. Les grains blancs ou gris très clairs correspondent aux grains de ciment anhydre. Les zones grises sont représentatives des hydrates, soit de la portlandite, soit des C-S-H. Enfin, les grains très foncés correspondent aux grains de chamotte suivant le type de pâte. Les microphotographies montrent également certaines fissures apparues durant la préparation des échantillons et provoquées par la mise sous vide. Les zones noires sont des bulles d'air.

Les grains de ciment anhydre contribuent à augmenter la compacité de la microstructure par effet filler. Ceci engendre une augmentation des performances mécaniques à l'échelle macroscopique. De plus, ils procurent aux matériaux une capacité d'auto-cicatrisation sous conditions de fissuration avec un apport d'eau [22].

De la même manière, les résultats des évolutions des rapports Al/Ca vs (Si+Al)/Ca, permettant de mettre en évidence les phases siliceuses hydratées (C-S-H en particulier). Ce résultat est en accord avec les résultats des rayons X où aucune de ces phases n'avait été détectée. Il est donc probable que les sulfates soient absorbés par les C-S-H comme obtenu par Tafraoui .A [6].

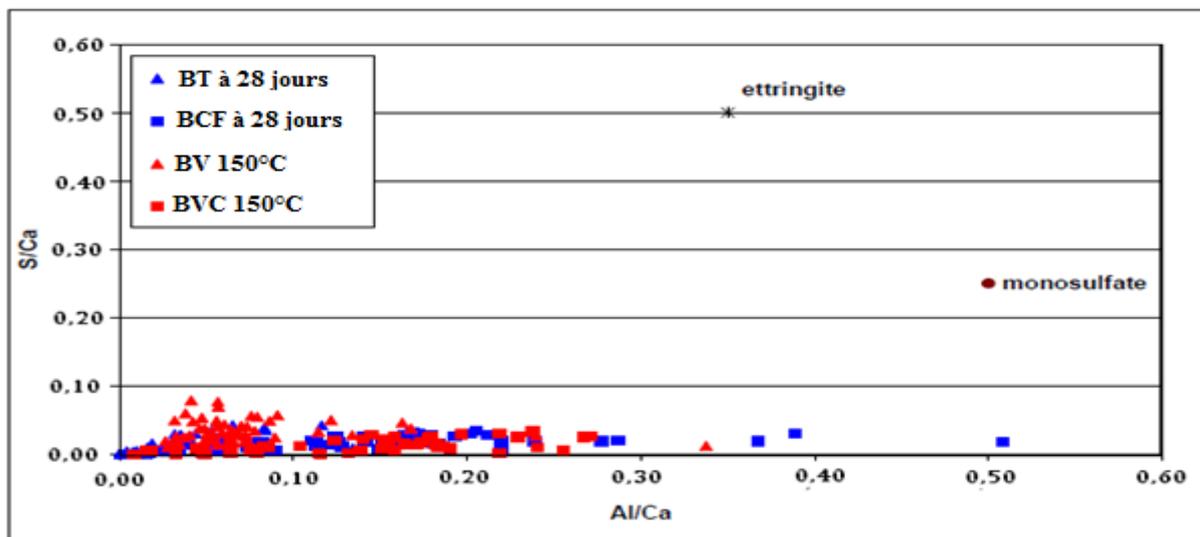


Figure III.20 : Analyse EDS de la pâte des BUHP : évolution des rapports élémentaires S/Ca vs Al/Ca.

En ce qui concerne les évolutions des rapports Al/Ca vs (Si+Al)/Ca, les commentaires suivants peuvent être faits :

- avec le sable de dunes, on peut noter deux nuages de points correspondants chacun à un type d'addition : le nuage le plus élevé correspond aux BUHP avec chamotte alors

Que celui mélange le plus bas correspond aux BUHP avec la vase. Ce résultat est « normal » compte tenu de la plus forte teneur en aluminium de la chamotte par rapport à la vase.

Au sein de chaque nuage, on observe que le BUHP traité à 150°C est juste placé en dessous de celui non traité thermiquement. Ceci signifie que la pâte est « enrichie » en silicium lorsqu'elle est traitée thermiquement. Ce résultat est en accord avec les observations de Richard et al [3] qui associent le traitement thermique avec une densification des C-S-H liée à un rapport Ca/Si plus faible. C'est d'ailleurs cet enrichissement en Si des C-S-H qui permet d'obtenir à haute température les hydrates les plus résistants tels que la xénolite ;

D'une part, le BUHP avec la vase présente un rapport Al/Ca plus élevé.

D'autre part, le traitement thermique conduit à une forte diminution du nuage de points du BUHP avec chamotte (vrai aussi avec la vase, mais le nuage correspondant aux analyses sans traitement thermique est sujet à caution). Ceci est à relier aussi à l'enrichissement en Si des C-S-H ;

L'enrichissement en Si des C-S-H après traitement thermique est beaucoup plus important dans le cadre de l'utilisation de sable de dunes. Il est donc possible que ce sable de dunes réagisse avec la pâte de ciment pour donner des hydrates plus compacts.

5.3 OBSERVATIONS DES BETONS FIBRES

Dans la figure III.21 « a », la présence de fibre n'est pas observable. Cela est dû soit à la disposition aléatoire des fibres dans le matériau, soit à la capacité de la pénétration du balayage (intensité du rayonnement).

Comme on l'a précisé auparavant, la partie blanche sur la figure III.21 « b » représente un grain de calcium. Le MEB permet de déterminer la composition chimique de la matrice.

De plus, l'échantillon de la figure III.21 « c » présente une forte concentration de calcium. La microfissuration n'est pas visible, le matériau est relativement homogène, il présente une surface assez uniforme.

La présence de fibre est nettement visible sur la figure III.21 « d ». On peut noter que la forme de la fibre permet une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.

La porosité est moins importante, les microfissures que l'on peut voir sur la figure III.21 « e » sont dues à l'opération de coupe de l'échantillon, elles sont situées sur l'extrême bord de ce dernier.

Pour l'échantillon de la figure III.21 « f », on observe que nous n'ayons pas la même homogénéité que pour le béton témoin. Les parties blanches représentent des grains de calcium, on constate aussi la présence de potassium, de magnésium.

L'adhérence fibre-matrice est quasi parfaite. On observe également un décollement de la fibre due à l'opération de coupe mécanique de l'échantillon III.21 « g ».

La figure III.21 « h » montre l'adhérence fibre-matrice pris dans u autre échantillon et confirme ce que a été vu sur la figure précédente. Les petits points noirs observés représentent des vides, la porosité pour le béton fibre est relativement importante.

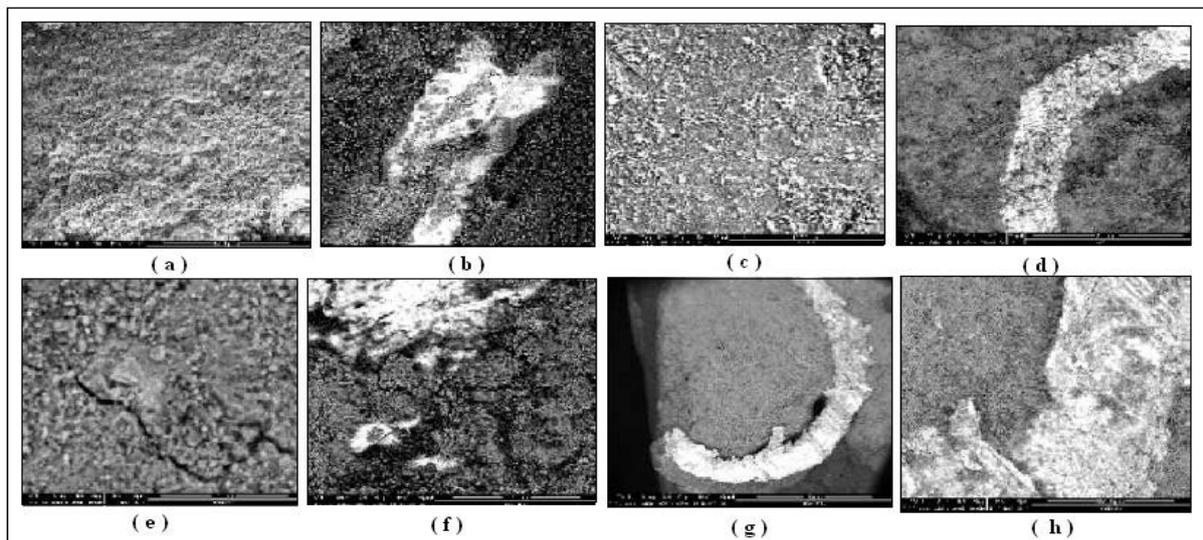


Figure III.21 : Béton à fibres Métalliques.

5.4 ANALYSE THERMIQUE PAR ATD ET ATG

Lors du traitement thermique, la mesure de la masse a permis de connaître la quantité d'eau perdue par les échantillons de béton testés. Ces observations sont couplées aux analyses thermiques réalisées par ATD et ATG, pour le diagnostic du béton et afin de suivre l'évolution des phases solides caractéristiques du béton au cours de l'échauffement. Deux prise d'essai de 200mg de béton avec chamotte et la vase ont été analysées, suivant un chauffage linéaire depuis la température ambiante jusqu'à 1400°C avec une vitesse de 10°C/min (figures III.22 et III.23).

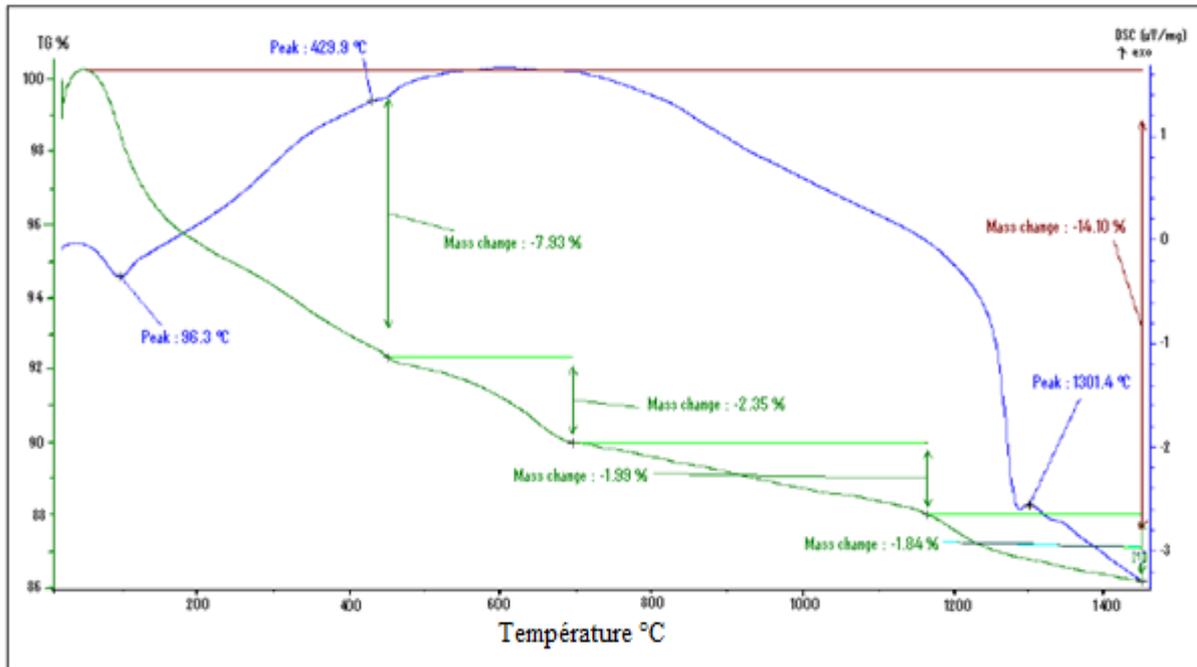


Figure III.22 : Analyse thermique différentielle du BFUP avec ajout de chamotte.

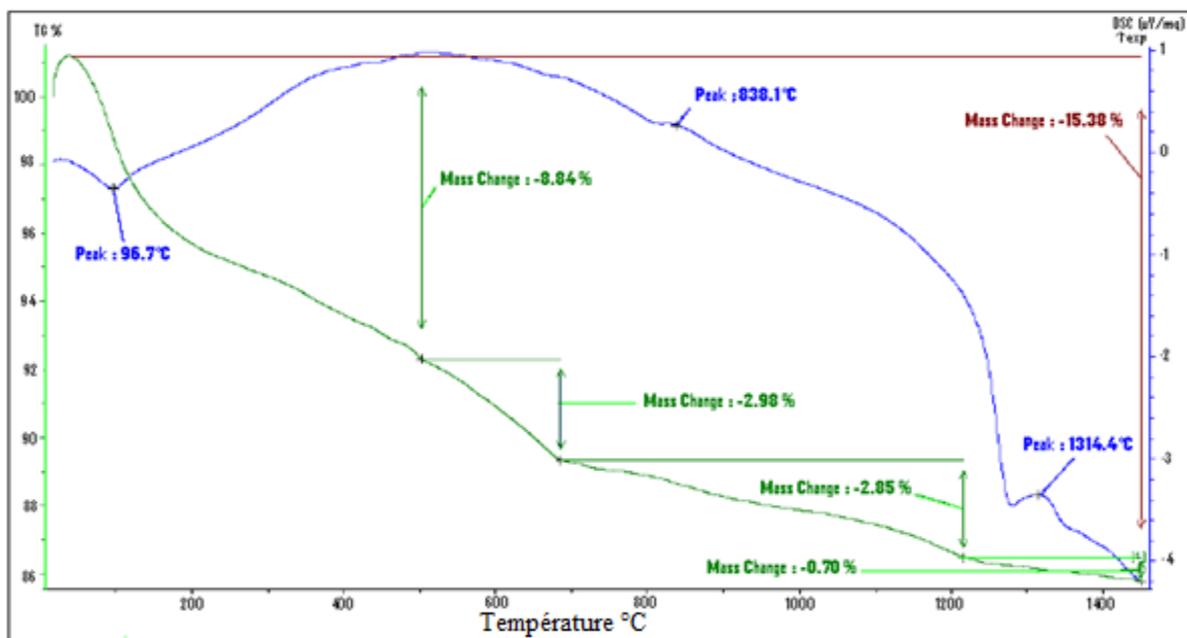


Figure III.23 : Analyse thermique différentielle du BFUP avec ajout de vase.

L'observation des courbes a permis de distinguer plusieurs phases :

Une phase de 20°C à 96,7°C liée essentiellement au départ de l'eau libre et une partie de l'eau liée [24]. Castellote et al. [56] note aussi une décomposition de l'ettringite et son élimination complète de la pâte de ciment avant 100°C.

Entre 96 et 429°C nous observons une accélération de la perte de masse de l'ordre de 7,93% pour le béton avec chamotte qui se caractérise par la déshydratation de la portlandite. Une réaction qui s'effectue en libérant de l'eau.

Dans le domaine allant de 600 à 700°C se produit la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés. Selon Noumowé [24], cette déshydratation s'accompagne d'une libération des molécules d'eau et de la création d'une nouvelle forme de silicates bicalcique la courbe indique une perte de masse de l'ordre de 2,35% pour le béton avec chamotte et 2,98% pour le béton avec la vase.

Il est bien défini dans la littérature que dans l'intervalle des températures entre 700°C et 900°C les calcaires se décomposent, cette décomposition engendre la libération de la chaux [57]. Dans cet intervalle de température la courbe indique un pic endothermique à 838,1°C pour l'échantillon de béton avec la vase, néanmoins on remarque l'absence de ce pic pour l'échantillon de béton avec chamotte. de la pâte de ciment et des granulats, l'élimination des sulfates et l'évaporation des alcalins [58]. La courbe indique un pic endothermique vers 1301,4°C pour le béton avec chamotte avec une perte de masse de 1,99% et 1,84% pour le béton avec ajout de vase 1314,4 °C.

6. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées sur l'influence des additions minérales et les fibres sur la variation des propriétés chimiques et physico-mécanique de BFUP :

- A l'état frais et à formulation constante, le mélange témoin conduit à une plus grande fluidité que celui obtenu avec la chamotte et la vase il est de même en ce qui concerne les fibres métalliques.

La vase et la chamotte se caractérisent par une grande absorption d'eau ceci a entraîné une chute de l'ouvrabilité du BUHP. Egalement l'incorporation d'une quantité des additions (vase et chamotte) diminue significativement l'étalement du BUHP et d'autant plus, lorsque le superplastifiant est faiblement introduit.

- la Fluidité diminue légèrement en présence des ajouts (la vase et la chamotte) et les masses volumiques à l'état frais augmentent progressivement par l'introduction des ajouts et des fibres.

Ainsi, les résultats obtenus des résistances mécaniques au cours de cette étude sont meilleures à 28 et 90 jours pour le BUHP incorporés de fibres. Également la présence des fibres métalliques est le paramètre majeur permettant d'obtenir des performances mécaniques élevées en flexion.

Effectivement, le vase est une addition inerte ne pouvant avoir qu'un effet de remplissage et de germination hétérogène et comme sa finesse est proche à celle du ciment son influence n'est pas notable. La chamotte en combinaison avec la vase, contribuent à la diminution de l'absorption par immersion par la production en plus grande quantité de C-S-H, mais aussi plus dense.

Les résultats montrent des légères différences entre les pâtes selon la nature de l'addition. Ceci est directement lié à la composition chimique de l'addition, uniquement composée de silice pour la vase ou comportant aussi de l'alumine pour la chamotte.

Les observations MEB mettent en évidence une structure très compacte avec de très nombreux grains de ciment anhydres ;

Les analyses EDS réalisées sur la pâte confirment l'absence de phases aluminates hydratées (ettringite, monosulfate). Ainsi, les sulfates doivent être préférentiellement absorbés par les C-S-H.

Ces analyses mettent aussi en évidence l'enrichissement de la pâte de ciment en Si lors du traitement thermique à 150°C. Cet enrichissement, décrit dans la littérature, est beaucoup plus important en présence du sable de dune.

Conclusion Générale
Perspectives
Références Bibliographiques

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce travail de thèse a été d'évaluer les propriétés des additions (la chamotte et la vase) ainsi que la valorisation du sable de dune, matériau très abondant et peu valorisé du sud de l'Algérie. Compte tenu de ses caractéristiques, ce sable est apparu comme étant un composant potentiel pouvant être utilisé dans la fabrication des Bétons à Ultra Hautes Performances Fibré (BUHP en présence de fibres).

Cependant, ces bétons sont relativement onéreux du fait principalement de l'utilisation de grandes quantités de chamotte et la vase, sous-produit industriel devenu en quelques années un produit rare et cher. Ainsi, pour promouvoir l'utilisation de BFUHP dans la majorité des pays. Notre choix s'est porté sur la chamotte.

L'étude bibliographique a fourni de nombreuses informations sur le béton ultra hautes performances utilisé, notamment, sur les additions utilisées et qui a porté à la fois sur les BFUHP et sur la chamotte. Elle a permis de mieux comprendre les bases scientifiques à l'origine du développement de ces nouveaux matériaux et de connaître leurs propriétés d'usage même si les ressources bibliographiques sont peu nombreuses et souvent à caractère commercial. Cette bibliographie nous a défini notre plan d'études et précisé les formulations à tester.

La mise au point de formulation de BFUP à moindre coût de production par rapport à ceux existant sur le marché actuel a été traitée dans le chapitre 2. Incorporer des matériaux locaux, sable siliceux et la chamotte et la vase comme ultrafine, réduire autant que possible les quantités de ciment et de fibres métalliques, sans recours au traitement thermique de manière à limiter l'impact et le coût énergétique. Suite à une étude préliminaire de sélection des différents matériaux, nous avons identifié deux paramètres influents pouvant améliorer la compacité et donc les performances des BFUP, a été destinée à qualifier le sable de dune. Plusieurs matériaux ont été étudiés et il s'est avéré que leurs caractéristiques étaient proches : même nature minéralogique, même étendue granulaire (100 – 400 μm), très propres. De fait, un seul matériau, a été utilisé pour la valorisation des sables de dune dans les BFUHP.

L'étude du comportement à l'état frais et l'état durci, détaillée dans le chapitre 3, avait pour objectif de caractériser les quatre BFUP et également de proposer des préconisations et des bonnes pratiques de production et de mise en œuvre de ces nouveaux matériaux en usine de

préfabrication. Elle s'est décomposée en une étude préliminaire, destinée à l'optimisation des formulations, une étude mécanique proprement dite, une étude des caractéristiques mécaniques, une étude de durabilité et, enfin, une étude de microstructure.

L'étude préliminaire a été réalisée afin d'optimiser les formulations des BFUHP du point de vue de leur fabrication, leur mise en œuvre et leurs performances. Pour cela, nous avons bâti un plan d'expérience permettant d'étudier sur le plan mécanique à la fois l'influence du remplacement de la vase par la chamotte. (Du fait d'un problème d'approvisionnement en sable de dune). Les résultats ont démontré l'intérêt de la substitution par la chamotte et confirmé les intérêts respectifs de la présence des fibres, du vase pour obtenir des performances très élevées.

L'étude mécanique a été réalisée sur bétons fibrés (BFUP) et les paramètres étudiés ont été le sable de dune, le type d'addition (chamotte, la vase). Elle a porté sur les résistances à la compression, à la flexion 3 points et à la traction. Les résultats montrent que le sable de dune est un matériau fort prometteur puisqu'il permet d'obtenir à la fois une très bonne fluidité des BFUP et aussi les meilleures résistances mécaniques lorsqu'il est associé à la chamotte et la vase. Son comportement vis-à-vis de l'étuvage est aussi très favorable, tous les résultats obtenus en compression dépassant les 90MPa.

Les essais d'absorption d'eau, réalisés sur les mêmes bétons, ont consisté à suivre l'évolution d'absorption dans le temps. Les résultats obtenus montrent que les fibres métalliques ont à tendance à augmenter légèrement l'absorption d'eau (alors que la chamotte a plutôt tendance à les diminuer (par rapport à la vase).

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au renforcement du béton par les fibres métalliques et les additions. Notre attention a été portée sur la durabilité du BUHP. pour de nombreux essais, les valeurs obtenues sont en-deçà des limites de mesure. Lorsque les grandeurs étaient mesurables (absorption capillaire, absorption par immersion), les comportements des différents BUHP étaient proches, bien que ceux avec chamotte s'avèrent légèrement moins performants. Par contre, aucune incidence du sable n'a été notée.

Enfin, les essais de microstructure ont mis en évidence une grande quantité de grains de ciment anhydres, ils ont montré que la majorité des hydrates étaient non cristallisés (type C-S-H) et que le seul hydrate visible était la portlandite en absence de traitement thermique. Les analyses chimiques ponctuelles réalisées sur la pâte ont confirmé

l'enrichissement en silice des C-S-H lié au traitement thermique. Elles ont montré aussi un enrichissement en Si de la pâte directement lié à la présence de sable de dune ce qui tend à montrer que ce matériau réagit lors du traitement thermique. Cette réaction est à relier à l'amélioration du comportement mécanique des BFUP avec le sable de dune et traité thermiquement.

Ainsi, à l'issue de ce travail de thèse, nous avons démontré qu'il était parfaitement possible de réaliser des BUHP ou BFUP en utilisant du sable de dune, de la chamotte et de la vase. Nous avons donc trouvé une voie de valorisation très intéressante pour le sable de dune aussi bien sur le plan technique qu'économique. Ce type de matériau pourrait être envisagé dans la fabrication d'éléments de construction, tels que des poutres, ou même des ouvrages entiers, tels que les ponts préfabriqués.

Perspectives

De nombreuses perspectives s'inscrivent dans la continuité de ce travail.

A l'état frais, nous avons vu que les BFUP à base de chamotte sont caractérisés par une viscosité plastique élevée, qui est due à la forme irrégulière des grains de chamotte. Une telle viscosité peut avoir des effets défavorables sur la mise en œuvre de ces matériaux. Elle peut être à l'origine de la teneur non négligeable en air occlus qui pourrait affecter les performances mécaniques, puisque ces bulles représenteraient des points de faiblesse ou zones de moindre résistance mécanique.

A l'état durci, une composition de béton avec addition n'a pas été classée réglementairement en tant que BFUP. Il sera intéressant de mener une étude d'optimisation de la compacité pour cette composition en utilisant par exemple un sable fin correcteur en complément du sable actuel. Cette étude pourrait être étendue aux BFUP les plus résistants bien évidemment. A ce titre, on pourra être amené à réfléchir sur l'intérêt d'appliquer un traitement thermique de type I à température modérée. En effet, une augmentation non négligeable des performances mécaniques a été constatée sur nos matériaux. Une activation thermique qui accélérerait les réactions d'hydratation permettrait d'atteindre dès 28 jours les performances mesurées. Concernant l'étude de la microstructure, il sera intéressant d'effectuer les analyses plus poussées sur pâtes et sur bétons, en particulier des observations au MEB couplées avec des analyses élémentaires EDS afin d'étudier précisément les proportions d'éléments dans les hydrates formés et identifier ces hydrates, notamment ceux en présence de chamotte, avec un suivi dans le temps. Les résultats de la porosité accessible à l'eau, il serait judicieux d'étudier la distribution porale par la porosimétrie à mercure. Ceci permettrait de confirmer les hypothèses avancées lors de l'analyse des résultats de retrait.

Cette étude se voulait exploratoire. Elle laisse donc encore de nombreuses perspectives parmi lesquelles :

- l'optimisation des formulations sans traitement thermique : nous avons uniquement dupliqué des formulations existantes et remplacé poids pour poids les constituants.

Nous sommes conscients que cette approche était rudimentaire et allait conduire à des résultats non optimisés. Compte tenu des acquis de ce travail de thèse, on pourrait procéder à

une optimisation de la formulation sur des critères techniques et économiques ; l'optimisation du traitement thermique : nous nous sommes limités à un traitement thermique de 150°C.

- scientifique : plusieurs questions sont restées en suspens au cours de ce travail. Ainsi, la réactivité du sable de dune au traitement thermique, la reprise d'humidité en conditions de dessiccation, l'absence de fluage de dessiccation, sont autant de points sur lesquels il faudrait apporter une réponse ;
- réglementaire : nous avons vu que les règlements ou recommandations actuelles ne permettraient pas de prévoir de manière précise le comportement de ce type de BFUP. En bâtissant un plan d'expérience adéquat, il faudrait proposer des extensions permettant de couvrir ce nouveau domaine de résistance.

Références bibliographiques

- [1] **Abdul Wahab Farid et al, 1992.** Fiber effect on cracking of concrete due to shrinkage. Fourth RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, R.N. Swamy ed., E.& F.N. Spon. pp. 102-113.
- [2] **Bonneau Olivier, 1997.** Etude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à Ultra Hautes Performances. Thèse de doctorat, département de génie civil, université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [3] **Richard Pierre et al, 1995.** Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 112-121.
- [4] **De Larrard François , 1994.** Optimization of ultra-high performance concrete by using a packing model », Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, pp. 997-1009.
- [5] **Holschemacher Klaus, Mueller Torsten and Ribakov Yuri. 2010.** Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. Materials and Design. 31: 2604-2615.
- [6] **Tafraoui Ahmed, 2009.** Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [7] **Yang Sungchul et al, 1997.** Splitting Tension Tests to Determine Concrete Fracture Parameters by Peak-Load Method, Advanced Cement-Based Materials, Vol. 5, pp. 18-28.
- [8] **Roosefid Mohsen, Ouedraogo Evariste, Prompt Nicolas, Miras A, Septembre, 2005.** Caractérisation et modélisation du comportement thermomécanique de bétons réfractaires silico-alumineux, in : 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes.
- [9] **Kriker Abdelouahed, 2005.** Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climats chaud et sec, Thèse de doctorat d'état, ENP, Algérie.
- [10] **Proulhac Nicolas et Lann KER. , 2006.** Rapport Final du Schéma Directeur de gestion et de valorisation des sédiments de dragage de Rouen et Tancarville. Département de La Gironde .Bassin d'Arcachon.
- [11] **Rossi Pierre, Renwez Stéphane, Belloc A., 1995.** Les bétons fibrés à ultra-hautes performances, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 196, pp. 61-66, Paris, France.
- [12] **Behloul Mouloud, 1996.** Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances (bétons de poudres réactives. Du matériau à la structure (Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, no 96 DENS 0026, pp 164).
- [13] **Rossi Luca et al 1996.** Integration of complete transferred DNA units is dependent on the activity of virulence E2 protein of Agrobacterium tumefaciens. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 93, pp 126-130.
- [14] **Rossi Pierre, 1998.** Les bétons de fibres métalliques. Presses de L'ENPC, Paris.
- [15] **Markovic Ivan, 2006.** High-Performance hybrid-fiber Concrete: Development and Utilization, PhD Thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-407-2621-3.

- [16] **Stark Jochen, Wicht Bernd, 2001.** Dauerhaftigkeit von Beton Der Baustoff als Werkstoff. Bau Praxis, Weimar.
- [17] **Bailly Moret, 1990.** Comportement mécanique des composites ciment-fibres, l'apport des essais dynamiques. Rapport scientifique du GRECO II Géomatériaux, pp. 295-311.
- [18] **Casanova Pascal, 1995.** Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau. Thèse de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [19] **Chaussadent. T. 1999.** Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé. Etude et recherches des LPC, Série Ouvrage d'art OA 29, Ed. LCPC, pp. 80.
- [20] **Richard Pierre et Cheyrezy Marcel, 1995.** Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. Cement and Concrete Composites.
- [21] **Wille, K., Naaman, A.E. and El-Tawil, S, 2011.** Ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) record performance under tensile loading, Concrete International, vol 33, no 9, September, pp 35-41.
- [22] **Caquot Albert, 1937.** Le rôle des matériaux inertes dans le béton, pp. 562-582.
- [23] **Rougeau Patrick et al, 2000.** Les bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP). Synthèses des connaissances et étude de faisabilité sur prototype de laboratoire, Document de CERIB DDI 002.
- [24] **Noumowé A., 1995.** Effets des hautes températures (20 - 600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, No. 95 ISAL 0092, pp. 232.
- [25] **Dugat et al, 1995.** Etude expérimentale de la déformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudre réactive (BPR). Annales de l'ITBTP, n°532, mars avril.
- [26] **Bodet Raphaël, mai 2003.** Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. Rapport, CERIB, Réf. DDE 27.
- [27] **Neville Adam , 1995.** Properties of concrete. Fourth Edition, England: Longman Edition, pp. 844.
- [28] **Loukili Ahmed et al, 1999.** Hydration Kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. Cement and Concrete Research 29, pp. 577-584.
- [29] **Cheyrezy Marcel et Behloul Mouloud, 2001.** Creep and shrinkage of ultra-high performance concrete, dans Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of concrete and other Quasi-Brittle Materials, édité par F.J. Ulm, Z.P. Bažant and F.H. Witmann, Elsevier, Cambridge, pp. 527-538.
- [30] **Banthia et coll, 1993.** Restrained shrinkage cacking in fibre-reinforced cementitious composites, Journal of Materials and structures, 26 : pp. 405-413.
- [31] **Paillère et coll, 1993.** Le béton de fibres métalliques: état actuel des connaissances, Annales de l'ITBTP, n°515, série béton 302, juillet-août, pp. 39-68.

- [32] **Christoph Charron Holcin, september 2008.** L'industrie du ciment ; Données générales. Ecole thématique « matériaux cimentaires », 21 au 24 septembre, Holcim, pp.17-69.
- [33] **Taylor H.F.W., 1997.** Cement Chemistry, Thomas Telford, 2nd Edition, pp. 475.
- [34] **Baron Jacques et Malier Yves 1992.** La durabilité des bétons. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [35] **Longuet Paul, Burglen Lucien et Zelwer Arian, 1973.** La phase liquide du ciment hydraté. Revue des matériaux de construction et de travaux publics, 676 :pp. 35–41.
- [36] **Roux Nicole et al. 1995.** Etude expérimentale sur la Durabilité des Bétons de Poudres Réactives. Annales de L'ITBTP, no.532, pp. 133-141.
- [37] **Hansen Torben, 2003.** Physical structure of hardened cement paste. A classical approach, Materials and Structures, (19), pp. 423-436.
- [38] **Jennings Hamlin, 2000.** A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste, Cement and Concrete Research (30), pp. 101-116.
- [39] **Minet Jérôme, 2003.** Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydratés hybrides, Thèse de Doctorat de l'Université Paris XI Orsay, pp. 168.
- [40] **Diamond Sidney , 1986.** The microstructure of cement paste in concrete, Proceedings of the VIII International Cong. Chem. Cem., Rio de Janeiro, vol I, pp. 113-121.
- [41] **Chatterji S., Jeffery J. W., 1963.** A new hypothesis of sulphate expansion, Magazine of Concrete Research, (15), pp. 84-86.
- [42] **Berthollet Amandine, 2003.** Contribution à la modélisation du béton vis-à-vis du vieillissement et de la durabilité : interaction des déformations de fluage et du comportement non linéaire du matériau, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, pp. 300.
- [43] **Mitani H., 2003.** Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux, Thèse de Doctorat de l'ENPC, pp. 182.
- [44] **Claude Pierre Aútcin, 2001.** Bétons haute performance. Editions Eyrolles.
- [45] **Lema . J et al, 1978.** Le frittage lié aux transformations chimiques de l'argile pendant son durcissement, Silicates Industriels, pp. 101-107.
- [46] **Kick Friedrich, 1885.** Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen : Nebst Versuchen über das Verhalten verschiedener Materialien bei gleichen Formänderungen sowohl unter der Presse als dem Schlagwerk Verlag von Arthur Felix.
- [47] **Robert Snyder et Jenkins Ron, 2012.** Introduction to X-Ray powder diffractometry. Wiley Interscience, pp. 335-341.
- [48] **Rahman Hamid et Strothenk. S, Paulmann Carsten et Feustel U. 1996.** Interpretation of mullite real structure via inter-vacancy correlation vectors. J. Eur. Ceram. Soc.. Vol. 16. pp. 177-186.

- [49] **Richard Pierre et Cheyrezy Marcel, (a et b) 1995.** Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
- [50] **Sibi Malek, 2011.** Comportement thermomécanique et endommagement de nouveaux réfractaires verriers à très haute teneur en zircone : investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et émission acoustique. PhD thesis, de l'INSA de Lyon, pp. 283.
- [51] **Malier Yves et al, 1995.** Les bétons de poudres réactives (BPR) à ultra haute résistance (200 à 800 MPa). Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics n°532, série: béton 320. ISSN 0020-2568.
- [52] **Neville Adam., 1992.** Propriétés des bétons, Ed. Eyrolles, pp. 805.
- [53] **Feldman Rolf et Sereda Peter, 13 Avril 1968.** A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties, Colloque RILEM Munich.
- [54] **Kanellopoulos Antonios, 2004.** Autogenous shrinkage of CARDIFRC ®.
- [55] **Wild S et al 1998.** Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of portland cement-metakaolin pastes. Adv. Cem. Res. 10, pp. 109-119.
- [56] **Castellote Marta et al, 2004.** Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. Cement and concrete Research, 34 (9) : pp. 1633-1644.
- [57] **Alonso Fernandez L-C, 2004.** Deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. Journal of materials sciences, Vol. 39, pp. 3015-3024, 2004.
- [58] **Schneider Ulrich et Diederich Ulrich, EHM C., 1981.** Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS. Nuclear engineering and design, Vol.67, pp.245-258.

ANNEXE

AFNOR, NF EN 12620, Août 2003. Granulats pour béton, AFNOR, (Indice de classement : P18-601).

AFNOR XP P18-545, Février 2004. Granulats - Eléments de définition, conformité et codification AFNOR.

NF EN 197-1, Février 2001. Ciment-composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (indice de classement P 15-101-1).

AFGC & Setra, 2002. Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. InterimRecommendations, Working group BFUP, Reference Setra: F0211.

NF EN 934-2/A2, Avril 2006. Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2 : adjuvants pour béton - définition, exigences, conformité, marquage et étiqueta

ملخص

تعد الخرسانة منذ نشأتها في أوائل القرن التاسع عشر عنصرا أساسيا في مجال البناء و التعمير، و بسبب الإستخدام الواسع و المكثف، هذا ما جعل من مسألة الجودة و المتانة محل إهتمام الجميع في الوقت الراهن . و الهدف المرجو من ذلك هو إنتاج خرسانة عالية الجودة ذات مقاومة تصل إلى حدود 150 ميجا باسكال معتمدين على إسمنت ذو كفاءة عالية، بالإضافة إلى الحصى والمدن المتفوق الذي لا يؤدي إلى دخول الهواء المحبوس.

ولقد إنصب اهتمامنا في دراستنا هذه على إنتاج خرسانة مسلحة عالية الأداء واقتصادية في آن واحد إنطلاقا من مواد محلية متوفرة في السوق الجزائرية، حيث إن هذه الأخيرة لها تأثير واضح على الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية وكذلك متانة الخرسانة. حيث ركزنا في هذه الدراسة على مدى تأثير الألياف المعدنية و الإضافات (الصلصال و طمي السد) في الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للخرسانة. إنطلاقا من نسب مثلى لكل من الألياف و الإضافات من أجل الحصول على أفضل النتائج فيما يخص تأثير هذه الأخيرة على متانة الخرسانة و خصائصها الميكانيكية مثل (مقاومة الضغط، مقاومة الشد و المرونة).

الكلمات المفتاحية: م ع أ، الخرسانة، الألياف، الإضافات، الرمل، البنية المجهرية.

Résumé

Depuis sa création au début du 19^{ème} siècle, le béton a été un élément essentiel dans le domaine de la construction et de la reconstruction, en raison de son usage intensif et intensif, a soulevé la question de la qualité et de la durabilité pour tous. L'objectif est de produire du béton de haute qualité avec une résistance jusqu'à 150 MPa basée sur un ciment très efficace, ainsi que des granulats particulièrement performants et d'un superplastifiant qui n'entraîne pas d'air piégé.

Dans cette étude, nous sommes concentrés sur la production de béton ultra haute performance, économique et basé sur des matériaux locaux disponibles sur le marché algérien, ce qui a un effet évident sur les propriétés mécaniques et physiques ainsi que sur la durabilité du béton. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'effet des fibres métalliques et des additifs (chamotte et la vase) sur les propriétés physiques et chimiques du béton. Basé sur des pourcentages optimaux de fibres et d'additifs pour obtenir les meilleurs résultats pour leur durabilité du béton et les propriétés mécaniques telles que résistance à la compression, résistance à la traction.

Mots-clés : BFUHP, béton, fibres, ajout, sable et microstructure.

Abstract

Since its creation in the early 19th century, concrete has been an essential element in the field of construction and reconstruction, because of its intensive and intensive use, raised the question of quality and sustainability for all. The aim is to produce high quality concrete with a strength up to 150 MPa based on a very efficient cement, as well as particularly efficient aggregates and a superplasticizer that does not cause trapped air.

In this study, we are focused on the production of ultra high performance concrete, economical and based on local materials available on the Algerian market, which has a clear effect on the mechanical and physical properties as well as the durability of concrete. In this study, we focused on the effect of steel fibers and additives (chamotte and mud) on the physical and chemical properties of concrete. Based on optimal percentages of fibers and additives to achieve the best results for their concrete durability and mechanical properties such as compressive strength, tensile strength.

Keywords : UHPFRC, concrete, fiber, adding, sand and microstructure.

Activités de Recherche

➤ *Publications Internationales :*

- European journal of Environmental and Civil Engineering, 2116-7214, 07/07/2018.

➤ *Communications Internationales :*

- CITEDUB 3, USTHB-Alger les 26 et 27 Septembre 2016.
- 3rd International Symposium on Materials and Sustainable Development ISMSD2017 November 07 & 08, 2017 Boumerdes-Algeria.
- Séminaire International de Génie Civil sur les Matériaux cimentaires, «SIGC2018» Oran les 27 & 28 Novembre 2018.