



HAL
open science

Développement de bétons fibrés ultra performants pour la réalisation d'éléments de structure préfabriqués

Elsa Nguyen Phuong Amanjean

► To cite this version:

Elsa Nguyen Phuong Amanjean. Développement de bétons fibrés ultra performants pour la réalisation d'éléments de structure préfabriqués. Matériaux composites et construction. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015. Français. NNT : 2015TOU30309 . tel-01331316

HAL Id: tel-01331316

<https://theses.hal.science/tel-01331316>

Submitted on 13 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *Université Toulouse 3 Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Génie Civil*

Présentée et soutenue par *Elsa NGUYEN PHUONG AMANJEAN*
Le *mardi 1 décembre 2015*

Titre :

**Développement de Bétons Fibrés Ultra Performants pour la réalisation
d'éléments de structure préfabriqués**

JURY

Jean-Philippe CHARRON, Professeur, Polytechnique Montréal	Rapporteur
William PRINCE-AGBODJAN, Professeur, INSA de Rennes	Rapporteur
Gilles ESCADEILLAS, Professeur, Université Paul Sabatier	Examineur
Thierry VIDAL, Maître de Conférences, Université Paul Sabatier	Examineur

Ecole doctorale : *MEGEP*
Unité de recherche : *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions*
Directeur(s) de Thèse : *Thierry VIDAL*

REMERCIEMENTS

Le présent travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) à l'Université Paul Sabatier et à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse Monsieur Thierry VIDAL, pour son soutien, son encouragement et sa compréhension dans les moments difficiles de la thèse. Je le remercie chaleureusement pour tous ses efforts, son dévouement dans le suivi de ce travail, ainsi que son professionnalisme et sa grande générosité scientifique et humaine.

Je remercie Monsieur Jean-Philippe CHARRON, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal, et Monsieur William PRINCE-AGBODJAN, Professeur des Universités à l'INSA de Rennes, qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de mon travail et ont accepté de consacrer du temps pour la lecture et le jugement de mon mémoire de thèse. Leurs remarques et suggestions lors de la lecture du mémoire m'ont permis d'apporter des améliorations de ce dernier. Mes sincères remerciements à Monsieur Gilles ESCADEILLAS, Professeur à l'Université Paul Sabatier et Directeur du LMDC, de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, mes chaleureux remerciements pour ses remarques importantes permettant l'achèvement de ce travail. Je le remercie également pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je remercie également Madame Ginette ARLIGUIE, de m'avoir accueilli en Master 2 Recherche.

Je voudrais exprimer mes remerciements aux personnels enseignants-chercheurs, administratifs et techniques du LMDC qui m'ont été d'une grande aide. Je remercie également les personnels de la Division Transfert de m'avoir fait profiter de leur expérience. Vanessa, Maud, Carole, Pierre, Fred, Marlène, Lauren, les moments en vos compagnies étaient formidables, merci pour tout...

Je tiens également à remercier mes collègues doctorants qui étaient présents au cours de ces années de thèse.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille pour son soutien indéfectible depuis toujours. Merci à mon « *Bạn Đòi* » qui me soutien durant toutes ces années, et que les meilleures restent à venir...

Hãy làm những việc bình thường bằng lòng say mê phi thường (Accomplir des choses ordinaires avec une envie extraordinaire)...

RESUME DE LA THESE

Les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) sont les matériaux cimentaires aux performances les plus exceptionnelles. Ils se distinguent par des résistances caractéristiques à 28 jours en compression et en traction supérieures respectivement à 150 MPa et 6 MPa. Dans une politique globale de gestion économique et d'impact écologique de l'entreprise Lagarrigue, l'utilisation de BFUP en substitution des bétons de classe de résistance ordinaire en préfabrication paraît pertinente. Cependant, les formulations actuelles onéreuses et peu écologiques limitent leur utilisation et leur essor. Cette étude a pour but de proposer des formulations de BFUP industrialisables caractérisées par un meilleur bilan économique et écologique, et conformes aux exigences de la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470). Suite à une première étude de formulation et d'optimisation, quatre compositions de BFUP ont été mises au point sans traitement thermique, trois à base de métakaolin et une de référence plus classique avec fumée de silice. Leur caractérisation à l'état frais et à l'état durci a ensuite été réalisée afin de dresser leurs cartes d'identité et de les situer de manière réglementaire selon la prénorme (PR NF P18-470). Les bétons formulés sont autoplaçants et thixotropes. Le caractère thixotrope pouvant causer une discontinuité de l'interface entre deux couches de béton lors du coulage, des recommandations vis-à-vis du phasage de fabrication et de bétonnage ont été proposées. A l'état durci, un BFUP avec métakaolin et celui équivalent avec fumée de silice atteignent des résistances en compression supérieures à 150 MPa permettant de les classer en BFUP-S utilisables pour les structures alors que les deux autres formules à base de métakaolin dépassant les 130 MPa sont classés en BFUP-Z non structuraux (PR NF P18-470). En traction, trois BFUP sont de classe T2, leurs résistances élastiques et de post-fissuration sont respectivement comprises entre 6,0 et 8,0 MPa, et entre 4,6 et 7,0 MPa, une dernière composition étant à la limite de classification avec une résistance élastique et post-fissuration de 5,9 et 4,0 MPa respectivement. Les valeurs limites de retrait et du coefficient de fluage de la prénorme (PR NF P18-470) sont respectées. L'étude de la microstructure a permis de conforter certaines hypothèses émises lors de la caractérisation mécanique, notamment le retrait et le fluage. L'étude des propriétés de transfert montre une durabilité potentielle très élevée. La dernière phase constitue un aboutissement de ce projet avec la première application industrielle, basée sur le dimensionnement selon la future norme de calcul BFUP (PR-NF P18-710), qui concerne la réalisation d'éléments préfabriqués d'un ouvrage.

Mots-clés : Bétons Fibrés Ultra Performants, formulation, comportement à l'état frais, comportement mécanique, microstructure, propriétés de transfert, dimensionnement.

ABSTRACT

Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes are cementitious materials of exceptional performances. They are characterized by a compressive and tensile strength over respectively 150 MPa and 6 MPa at 28 days. Within a global management of economic and the environmental impact of Lagarrigue company, the use of UHPFRC in substitution of ordinary concrete in precast elements seems relevant. However, expensive materials and environmental cost of current mix design restrict their use and development. This study aims at proposing UHPFRC mix designs which are characterized by better economic and environmental cost and respect criteria of the pre-standard UHPFRC materials (PR NF P18-470). Firstly, an optimization study of UHPFRC mix design has been established, four mixtures have been developed without heat treatment application, three of them based on metakaolin and one with silica fume as a reference mixture. Secondly, the characterization of fresh and hardened state was conducted in order to establish their identity cards and confront them to the criteria of (PR NF P18-470). In the fresh state, all concretes studied are self-compacting concretes and present thixotropic character. The thixotropic character may cause a discontinuity of the interface between two layers of concrete during casting, recommendations of manufacturing and casting process have been proposed. In the hardened state, one UHPFRC with metakaolin and another one with silica fume reached compressive strengths over 150 MPa, they could be classified as UHPFRC-S and could be used for structures designs while the two other mixtures based on metakaolin exceeded 130 MPa were classified as non-structural UHPFRC-Z (PR NF P18-470). For tensile behavior, three UHPFRC are classed T2, their elastic and post-cracking strengths are between 6.0 and 8.0 MPa, and between 4.6 and 7.0 MPa respectively, while the last mixture is in the classification limit with elastic and post-cracking strengths of 5.9 and 4.0 MPa respectively. The limit values of shrinkage and creep coefficient recommended (PR NF P18-470) were satisfying. The microstructure evaluation allowed strengthening certain assumptions made in the mechanical characterization, including shrinkage and creep. The durability characterization showed very high potential sustainability materials. The last part is an outcome of this research project with the first industrial application, based on the structural design of the UHPFRC future standard (PR NF-P18-710) which concerns the realization of precast elements of a structure.

Keys words: Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes, mix design, fresh behavior, hardened behavior, microstructure, durability, structural design.

Table des matières

RESUME DE LA THESE.....	5
Liste des figures.....	13
Liste des Tableaux.....	17
INTRODUCTION GENERALE.....	21
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	25
INTRODUCTION.....	27
1.1. Généralités	28
1.2. Composition des BFUP.....	29
1.2.1. Constituants	29
1.2.1.1. Ciment.....	29
1.2.1.2. Granulat	30
1.2.1.3. Additions pouzzolaniques.....	30
1.2.1.4. Rapport Eau/Liant.....	33
1.2.1.5. Superplastifiant	33
1.2.1.6. Fibres	34
1.2.2. Principe de formulation	36
1.2.3. Exemple de formulations	38
1.2.4. Coût de l'emploi des BFUP.....	40
1.2.5. Fabrication des BFUP.....	42
1.2.5.1. Fabrication au laboratoire	42
1.2.5.2. Fabrication en usine	43
1.2.5.3. Mise en œuvre.....	44
1.2.5.4. Cure et traitement thermique	44
1.3. Propriétés des BFUP	46
1.3.1. Propriétés à l'état frais	46
1.3.2. Propriétés mécaniques	49
1.3.2.1. Comportement en compression	50
1.3.2.2. Comportement en traction	55
1.3.2.3. Déformations différées des BFUP.....	62
1.3.3. Propriétés de transfert.....	80
1.3.3.1. Porosité	80
1.3.3.2. Perméabilité	81
1.3.3.3. Diffusion des ions chlorures	82
1.3.3.4. Carbonatation.....	83
1.3.3.5. Teneur en portlandite	84
1.3.3.6. Retours d'expériences.....	84
1.3.3.7. Evaluation des risques potentiels liés à la nature des BFUP	85
1.4. Aspects réglementaires et dimensionnements	87
1.4.1. Considérations générales	88
1.4.1.1. Classes associées au type de fibres et de résistance en compression	88
1.4.1.2. Classes de comportement en traction	88
1.4.1.3. Prise en compte des coefficients partiels de sécurité.....	93
1.4.2. Base de calcul des structures en BFUP	93
1.4.2.1. Etats limites ultimes (ELU)	93

1.4.2.2. Vérifications aux Etats Limites de Service (ELS).....	98
1.5. Applications	100
CONCLUSIONS	105
CHAPITRE 2 : MISE AU POINT DES FORMULATIONS	109
INTRODUCTION.....	111
2.1. Formulation des BFUP	112
2.1.1. Sélection des matières premières	113
2.1.1.1. Ciment	113
2.1.1.2. Additions	113
2.1.1.3. Granulats	114
2.1.1.4. Adjuvant	114
2.1.1.5. Fibres métalliques.....	114
2.1.2. Propriétés physico-chimiques des constituants	115
2.1.3. Rapport Eau/Liant (E/L).....	117
2.1.4. Mise au point des formulations	118
2.1.4.1. Travail préliminaire	118
2.1.4.2. Etude d'optimisation	123
2.1.4.3. Formulations retenues.....	133
2.2. Influence du type et de la capacité des malaxeurs	135
2.2.1. Analyse des évolutions de la puissance de malaxage sur malaxeur à train valseur de laboratoire.....	136
2.2.2. Etude comparative des propriétés des BFUP confectionnés dans différents malaxeurs	137
2.3. Influence des conditions de cure sur les propriétés mécaniques.....	139
CONCLUSIONS	142
CHAPITRE 3 : COMPORTEMENT A L'ETAT FRAIS	145
INTRODUCTION.....	147
3.1. Matériels et méthodes.....	148
3.1.1. Procédure de malaxage.....	149
3.1.2. Essai d'étalement au mini cône et d'écoulement à la mini-boite en L.....	150
3.1.3. Mesures au rhéomètre	151
3.1.4. Exploitation des données brutes des mesures au rhéomètre.....	152
3.2. Résultats et discussions	153
3.2.1. Propriétés rhéologiques immédiatement après le malaxage.....	154
3.2.1.1. Essais d'étalement au mini-cône et d'écoulement à la mini-boite en L.....	154
3.2.1.2. Mesures au rhéomètre	155
3.2.2. Propriétés rhéologiques en fonction du temps de repos après le malaxage	157
3.2.2.1. Evolution des valeurs d'étalement au mini-cône et d'écoulement à la mini-boite en L en fonction du temps de repos.....	157
3.2.2.2. Evolution des données obtenues au rhéomètre en fonction du temps de repos	158
3.2.2.3. Investigation de la thixotropie des BFUP étudiés	161
3.3. Impact de la thixotropie sur le process de production industrielle.....	164
CONCLUSIONS	166
CHAPITRE 4 : COMPORTEMENT A L'ETAT DURCI.....	169
INTRODUCTION.....	171
4.1. Matériels et méthodes.....	172
4.1.1. Fabrication et mesures effectuées à l'état frais	172

4.1.3. Mesure des propriétés mécaniques.....	174
4.1.3.1. Mesure des propriétés mécaniques instantanées	174
4.1.3.2. Déformations différées	183
4.2. Résultats expérimentaux	188
4.2.1. Mesures à l'état frais	188
4.2.2. Comportement mécanique instantané	188
4.2.2.1. Résistances moyenne et caractéristique en compression	188
4.2.2.2. Module d'élasticité en compression et coefficient de Poisson.....	192
4.2.2.3. Loi de comportement en compression.....	193
4.2.2.4. Comportement en traction	195
4.2.3. Comportement mécanique différé.....	209
4.2.3.1. Déformations de retrait.....	209
4.2.3.2. Déformations différées sous charge - fluage en compression.....	218
CONCLUSIONS	226
CHAPITRE 5 : MICROSTRUCTURE ET DURABILITE	229
INTRODUCTION.....	231
5.1. Matériels et méthodes.....	232
5.1.1. Microstructure	232
5.1.1.1. Analyses par Diffraction de Rayon X	232
5.1.1.2. Analyses thermiques.....	232
5.1.1.3. Observations au MEB	233
5.1.2. Propriétés de transfert.....	233
5.1.2.1. Mesure de la porosité accessible à l'eau	234
5.1.2.2. Mesure de la perméabilité au gaz	234
5.1.2.3. Coefficient de diffusion aux chlorures	236
5.1.2.4. Carbonatation accélérée	238
5.2. Résultats et discussions	239
5.2.1. Microstructure	239
5.2.1.1. Analyses par diffraction des rayons X et par thermogravimétrie.....	240
5.2.1.2. Observations au Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	245
5.2.2. Essais physico-chimiques de durabilité.....	247
5.2.2.1. Porosité accessible à l'eau	248
5.2.2.2. Perméabilité à l'azote	250
5.2.2.3. Diffusion des ions chlorures.....	252
5.2.2.4. Carbonatation accélérée	254
5.2.2.5. Classification vis-à-vis de durabilité potentielle de différents indicateurs de durabilité des BFUP	255
CONCLUSIONS	256
CHAPITRE 6 : JUSTIFICATION DES PREDALLES	259
INTRODUCTION.....	261
6.1. Description du projet.....	262
6.2. Coefficients de sécurité pris pour le calcul	262
6.3. Propriétés des matériaux	263
6.4. Actions en service et combinaisons fondamentales en phase de construction.....	264
6.5. Dimensionnement des prédalles.....	265
6.5.1. Justification de la section à ELU	265
6.5.1.1. Vérification vis-à-vis du moment de flexion à l'ELU.....	265

6.5.1.2. Non fragilité à l'ELU	265
6.5.1.3. Vérification vis-à-vis de l'effort tranchant à l'ELU	266
6.5.2. Vérifications à l'ELS	268
6.5.2.1. Contrainte limite	268
6.5.2.2. Maitrise de la fissuration	268
6.5.2.3. Flèche admissible	269
CONCLUSIONS	269
CONCLUSIONS GENERALES	271
PERSPECTIVES	277
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	279
ANNEXES	289

Liste des figures

Figure 1 - 1: Photographies illustrant les différents types des fibres métalliques pouvant être incorporées dans les BFUP	35
Figure 1 - 2: a) Relation entre la résistance en compression et la teneur en air occlus ; b) Relation entre l'étalement et l'air occlus selon (Wille et al., 2012)	37
Figure 1 - 3 : Influence de fibres de différentes longueurs et de grains de différentes tailles sur la compacité du mélange selon (De Larrard et Sedran, 1999).....	38
Figure 1 - 4 : Malaxeur EIRICH R08W	42
Figure 1 - 5: Diagramme de phase des C-S-H de (Verbeck et Copeland, 1972).....	46
Figure 1 - 6 : Influence de la teneur en fibres courtes ($l/d=6/0,16$) sur l'étalement de BFUP avec 2 types de granulats (Markovic, 2006).....	48
Figure 1 - 7 : Comportement rhéologique type des BFUP selon (Bonneau et Vernet, 1998)...	49
Figure 1 - 8: Relation « contrainte-déformation » en compression de Ductal [®] selon (Behloul, 1996).....	50
Figure 1 - 9 : Influence du rapport E/C sur la résistance moyenne en compression d'après les données bibliographiques du Tableau 1 - 8.....	53
Figure 1 - 10 : Résistances en compression en fonction de la teneur en fibres métalliques d'après les données bibliographiques du Tableau 1 - 8.....	54
Figure 1 - 11 : Comportement en traction des bétons renforcés de fibres (Naaman, 2007).....	56
Figure 1 - 12 : Influence de la teneur en fibres sur la résistance élastique et résistance post-fissuration en traction	60
Figure 1 - 13 : Comportement en traction directe pour différentes orientations de fibres : (a) : selon (Oesterlee, 2010); (b) : selon (Delsol, 2012).....	62
Figure 1 - 14 : Profil des contraintes d'une éprouvette soumise au retrait de dessiccation (Pons, 1998).....	63
Figure 1 - 15 : Influence du rapport E/L sur le retrait du BPR selon (Loukili, 1996).....	66
Figure 1 - 16: Influence de la teneur en métakaolin sur le retrait endogène mesuré selon (Brooks et Johari, 2001)	67
Figure 1 - 17 : Influence de la présence de fibres sur le retrait endogène de BFUP sans traitement thermique : a) selon (Loukili et al., 1999) ; b) selon (Kamen, 2007).....	69
Figure 1 - 18: Influence du traitement thermique sur le retrait endogène de BPR (Loukili, 1996).....	69
Figure 1 - 19: Comparaison du fluage propre spécifique en compression de Bétons à Ultra Hautes Performances BUHP de type BPR, de Bétons à Hautes (BHP) et Très Hautes Performances (BTHP), selon (Loukili, 1996)	75
Figure 1 - 20: Influence de la présence de fibres sur le fluage propre spécifique en compression du CRC à différents âges de chargement (Loukili, 1996).....	76
Figure 1 - 21 : Evolution des déformations différées de fluage en compression mesurées lors de l'étude relative à l'influence du traitement thermique selon (Francisco, 2012)	77
Figure 1 - 22 : Fluage propre spécifique en compression du BPR avec et sans traitement thermique en fonction de l'âge de chargement selon (Cheyrezy et Behloul, 2001).....	78
Figure 1 - 23 : Influence du taux de chargement sur les déformations de fluage de trois BFUP de type BPR (Bétons de Poudres Réactives) différents (Mixture No. 1, Mixture No. 2 et Mixture No. 3) (Colleparidi et al., 1997).....	79

Figure 1 - 24 : a) Essai de traction jusqu'à une déformation de 0,23% ; b) Coefficient de perméabilité équivalente à l'eau du BFUP étudié (Charron et al., 2008).....	82
Figure 1 - 25 : Loi pour les BFUP de classe T3 (obtenue directement en $\sigma(\epsilon)$) selon (PR NF P18-710)	90
Figure 1 - 26 : Loi conventionnelle pour les BFUP de classe T1 ou T2 (issue de courbe $\sigma(w)$) selon (PR NF P18-710).....	90
Figure 1 - 27 : Loi conventionnelle n°2 pour les éléments minces (PR NF P18-710)	92
Figure 1 - 28 : Loi conventionnelle n°1 pour les éléments minces (PR NF P18-710)	92
Figure 1 - 29: Diagramme des déformations relatives admissibles à l'état-limite ultime pour le BFUP non armé (PR NF P18-710).....	94
Figure 2 – 1 : Courbes granulométriques des fines et du sable	117
Figure 2 – 2 : Comparaison des résistances mécaniques avec les travaux de (Taфраoui, 2009)	120
Figure 2 – 3 : Courbes de séchage d'un matériau poreux : variation de la teneur en eau e (a) et du gradient d'évaporation de/dt (b), en fonction du temps t	125
Figure 2 – 4 : Résultats de mesure d'absorption d'eau de métakaolin : (a) variation de la teneur en eau en fonction du temps ; (b) gradient d'évaporation d'eau en fonction du temps.....	126
Figure 2 – 5 : Malaxeur à mortier et récipients utilisés pour les mesures de la masse volumique de la pâte.....	127
Figure 2 – 6 : Représentation du ratio des vides (voids ratio) en fonction du rapport volumique Eau/Poudre (W/CM ratio by volume) pour un taux de substitution donné de A/C (Kwan et al., 2012).....	129
Figure 2 – 7 : Résultats des essais de compacité humide	130
Figure 2 – 8 : Comparaison de résistances mécaniques à 28 jours des différentes formulations testées en fonction du dosage en ciment et du taux d'incorporation du métakaolin	132
Figure 2 – 9 : Suivi de la puissance développée par le malaxeur pendant le malaxage (enregistrement du Wattmètre).....	137
Figure 2 - 10 : Evolution en fonction du temps de la résistance moyenne en compression (après cure endogène) du béton 880-2%-MK fabriqué avec différents malaxeurs	139
Figure 2 - 11 : Evolutions des résistances moyennes en compression et en flexion en fonction des différentes cures : humide, endogène, et en dessiccation (séchage extérieur)	140
Figure 3 – 1 : Equipement pour les mesures d'étalement au mini cône et d'écoulement de la boîte en L.....	150
Figure 3 – 2 : Dispositif de mesure des paramètres rhéologiques (Cyr et Mouret, 2003).....	151
Figure 3 – 3 : Représentation du couple ou de la vitesse de rotation en fonction du temps....	152
Figure 3 – 4 : Etalements au mini-cône et temps écoulement à la mini-boîte en L à t_0	154
Figure 3 – 5 : Courbe d'écoulement de différents BFUP à t_0	155
Figure 3 – 6 : Evolution de l'étalement et du temps d'écoulement en fonction du temps de repos.....	157
Figure 3 – 7 : Courbes d'écoulement des BFUP étudiés après différents temps de repos	158
Figure 3 - 8 : Evolutions du seuil statique et de viscosité pastique en fonction du temps de repos.....	159
Figure 3 – 9 : Evolution des mesures d'étalement et de temps découlement en fonction respectivement du seuil statique de cisaillement et de la viscosité plastique.....	161
Figure 3 – 10 : Evolution du seuil statique de cisaillement en fonction du temps de repos....	162

Figure 4 - 1 : Mode de coulage.....	174
Figure 4 - 2: Dispositif d'essai pour la détermination du comportement en compression.....	176
Figure 4 - 3: Cage extensométrique pour la détermination de module d'élasticité et du coefficient de Poisson.....	177
Figure 4 - 4: Configuration d'essai de flexion 4 points (AFGC, 2013).....	181
Figure 4 - 5: Dispositif d'essai de traction par flexion.....	182
Figure 4 - 6: Instrumentation du capteur pour la mesure de l'ouverture de fissure	182
Figure 4 - 7: Dispositif d'essai de traction directe.....	183
Figure 4 - 8: Décomposition conventionnelle des déformations d'un béton selon (Proust, 2002)	185
Figure 4 - 9: Dispositif de mesure de retrait.....	186
Figure 4 - 10: Dispositif d'essai de fluage.....	187
Figure 4 - 11 : (a) L'évolution de la résistance en compression ; (b) Cinétique d'évolution de la résistance en compression.....	189
Figure 4 - 12 : Evolution en fonction du temps du module d'élasticité des BFUP étudiés	192
Figure 4 - 13 : Relation contrainte-déformation des BFUP étudiés, essais réalisés à 28 jours	194
Figure 4 - 14 : Résultats des essais en flexion 4 points des différents BFUP.....	196
Figure 4 - 15 : Courbes « contrainte équivalente-ouverture de fissure » des BFUP étudiés ..	199
Figure 4 - 16 : Lois de comportement en traction obtenues par analyse inverse des BFUP étudiés.....	200
Figure 4 - 17 : Lois de comportement moyennes et caractéristiques en traction des BFUP étudiés.....	202
Figure 4 - 18 : Aspect de l'échantillon après rupture et courbes contrainte de traction – ouverture de fissure pour le béton 880-2%-MK obtenues lors d'essais de traction directe	206
Figure 4 - 19 : Loi de comportement moyenne et caractéristique en traction directe du béton 880-2%-MK.....	207
Figure 4 - 20 : Evolution des déformations de retrait des différents BFUP	210
Figure 4 - 21 : a) Perte de masse en fonction du temps ; b) Retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse des quatre BFUP.....	212
Figure 4 - 22 : Evolution des retraits endogène, total, et de dessiccation des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK.....	215
Figure 4 - 23 : a) Perte de masse en fonction du temps ; b) Retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse des BFUP 880_2%_FS et 880_2%_MK	217
Figure 4 - 24 : Comparaison des modules d'élasticité des deux BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK déterminés à la mise en charge et par la méthode (RILEM, 1972).....	220
Figure 4 - 25 : Déformations sous charge des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK.....	220
Figure 4 - 26 : Evolution des déformations différées sous charge des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK.....	221
Figure 4 - 27 : Déformations de fluage spécifique propre, total et de dessiccation des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK	223
Figure 4 - 28 : Evolution du fluage de dessiccation en fonction du retrait de dessiccation des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK	225
Figure 5 - 1 : Cellule pour les essais de perméabilité au gaz (Kollek, 1989).....	235

Figure 5 - 2 : Schéma de principe de l'essai de migration des ions chlorures selon (NTBuild 492, 1999).....	237
Figure 5 - 3 : Diffractogrammes de la pâte CEM I avec fumée de silice à 7, 28, et 90 jours.....	240
Figure 5 - 4 : Diffractogrammes de la pâte CEM I avec métakaolin à 7, 28, et 90 jours	241
Figure 5 - 5 : Courbes DTG obtenues sur pâtes CEM I +FS et CEM I + MK à 7, 28, et 90 jours	243
Figure 5 - 6 : Observations au MEB avec indications de l'agrandissement	246
Figure 5 - 7 : Porosité accessible à l'eau de différents bétons	249
Figure 5 - 8 : Evolution de la perméabilité à l'azote en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'entrée et de sortie des quatre BFUP.....	251
Figure 5 - 9 : Fronts de pénétration des ions chlorures des BFUP étudiés	253
Figure 5 - 10 : Photographies des échantillons d'essai de carbonatation accélérée de quatre BFUP à 365 jours	254
Figure 6 - 1: Plan de prédalle à réaliser avec cotations en cm.....	262

Liste des Tableaux

Tableau 1 - 1: Hydrates formés en fonction du rapport CH/AS ₂ (Murat et Bachiorrini, 1982)	32
Tableau 1 - 2 : Les hydrates formés en fonction du temps (Garcia-Diaz, 1995) et du rapport CH/AS ₂ (De Silva et Glasser, 1993).....	32
Tableau 1 - 3: BUHP et BFUP utilisés pour la construction d'une passerelle à Sherbrooke au Canada (Aïtcin et al., 1998).....	39
Tableau 1 - 4 : Composition de différents BFUP : Ductal [®] (Graybeal, 2007), BSI [®] (Hajar et al., 2004) et CEMTEC [®] (Rossi et al., 2005).....	40
Tableau 1 - 5 : Prix approximatifs des matières premières pour les BFUP en 2000 (Rougeau et al., 2000) et à l'heure actuelle.....	40
Tableau 1 - 6 : Estimation du coût lié à la matière première des BFUP en 2015.....	41
Tableau 1 - 7: Classement des BFUP à l'état frais selon sa consistance (PR NF P18-470).....	47
Tableau 1 - 8 : Synthèse des valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de la cure appliquée, de la teneur en fibres métalliques et du rapport E/C.....	52
Tableau 1 - 9 : Synthèse des caractéristiques relatives au comportement en traction en fonction de du dosage volumique en fibres (V_f) et de leur élancement (L_f/d_f).....	59
Tableau 1 - 10 : Retrait endogène de différents BFUP sans traitement thermique et avec TT de type I.....	64
Tableau 1 - 11 : Retrait de dessiccation de différents BFUP.....	65
Tableau 1 - 12 : Fluage propre spécifique des BFUP dont l'âge et la durée de chargement sont variables.....	73
Tableau 1 - 13 : Synthèse des résultats de fluage propre spécifique en traction des BFUP à taux et âges de chargement différents.....	74
Tableau 1 - 14 : Valeurs de la porosité des BFUP.....	80
Tableau 1 - 15 : Valeurs du coefficient de diffusion des ions chlorures des BFUP.....	83
Tableau 1 - 16: Classes de résistance à la compression pour les BFUP (PR-NF P18-470).....	88
Tableau 1 - 17: Coefficient γ_{cf} relatif au béton fibré en traction.....	93
Tableau 1 - 18: Coefficient γ_c relatif au béton pour la limite en compression.....	93
Tableau 1 - 19 : Limitations de l'ouverture de fissure (w_{max}) à l'ELS (PR NF P18-710).....	99
Tableau 1 - 20 : Ouvrages en BFUP depuis 1997.....	100
Tableau 1 - 21 : Réalisation de renforcement avec du BFUP.....	103
Tableau 2 – 1 : Propriétés chimiques déterminées par spectrométrie et par chromatographie ionique, et propriétés physiques issues des fiches techniques des constituants (Annexe 1) ...	115
Tableau 2 – 2 : Composition massique du BFUP et étalement au mini cône.....	119
Tableau 2 – 3 : Résultats à l'état frais et à l'état durci à 28 jours des formulations de bétons testés.....	122
Tableau 2 – 4 : Composition massique de 3 BFUP testés (en kg pour 1 m ³ de béton).....	131
Tableau 2 – 5 : Composition en kg ou en % des formulations retenues pour l'étude de caractérisation.....	134
Tableau 2 - 6 : Programme expérimental établi pour l'étude de l'influence du type de malaxeur.....	136
Tableau 2 - 7 : Valeurs d'étalement au mini cône obtenues pour la formule 880-2%-MK en fonction du type de malaxeur.....	138
Tableau 3 – 1 : Temps de malaxage des BFUP étudiés.....	149

Tableau 3 – 2 : Seuil statique de cisaillement et viscosité plastique à t_0	156
Tableau 3 – 3 : Valeurs du paramètre de thixotropie A_{thix} et classification du caractère thixotropique des BFUP étudiés	163
Tableau 3 - 4 : Temps critique à ne pas dépasser entre les bétonnages des BFUP étudiés	165
Tableau 3 – 5 : Temps total d'un cycle de bétonnage d'un élément de préfabrication	165
Tableau 4 - 1: Programme expérimental pour la caractérisation des propriétés mécaniques..	173
Tableau 4 - 2: Valeur du coefficient de Student pour le calcul de la résistance caractéristique en compression	175
Tableau 4 - 3: Programme expérimental établi pour l'étude du comportement différé	184
Tableau 4 - 4: Résultats des mesures à l'état frais.....	188
Tableau 4 – 5 : Détermination de la résistance caractéristique des BFUP étudiés.....	191
Tableau 4 – 6 : Modules d'élasticité mesurés et estimés selon Eurocode 2 et coefficients de Poisson mesurés pour les différents BFUP.....	193
Tableau 4 – 7 : Valeurs caractéristiques du comportement en compression asservi en déplacement des BFUP étudiés	195
Tableau 4 – 8 : Détermination des différents paramètres obtenus à partir des essais en flexion 4 points sur les différents BFUP.....	198
Tableau 4 – 9 : Valeurs de résistance élastique et de résistance post-fissuration en traction des BFUP étudiés.....	202
Tableau 4 – 10 : Valeurs moyennes et caractéristiques des paramètres de traction calculés à partir des courbes des essais de traction directe et de traction par flexion.....	207
Tableau 4 - 11 : Synthèse des valeurs moyennes et caractéristiques de résistance en compression et en traction par flexion des bétons étudiés.....	208
Tableau 4 – 12 : Valeurs des retraits obtenues à 185 jours pour les différents BFUP	211
Tableau 4 – 13 : Comparaison du retrait endogène de différents BFUP sans traitement thermique	215
Tableau 4 – 14 : Paramètres nécessaires à l'interprétation des essais de fluage	219
Tableau 4 – 15 : Comparaison des valeurs de fluages spécifiques des BFUP étudiés à 386 jours avec ceux de la littérature	224
Tableau 4 – 16 : Valeurs des coefficients de fluage des BFUP étudiés en mode propre et en mode dessiccation (total)	226
Tableau 5 - 1: Programme expérimental de caractérisation de la microstructure	232
Tableau 5 – 2 : Détermination de la teneur en portlandite de deux pâtes à différentes échéances	244
Tableau 5 – 3 : Estimation de la surface des grains de ciment anhydre des deux pâtes à partir des images au MEB	247
Tableau 5 – 4 : Valeurs de porosité obtenues pour les BFUP étudiés.....	248
Tableau 5 - 5: Comparaison des valeurs de la perméabilité intrinsèque K_v des BFUP étudiés avec le critère exigé par (PR NF P18-470).....	251
Tableau 5 – 6 : Valeurs du coefficient de diffusion obtenues pour les BFUP étudiés	253
Tableau 5 – 7 : Evaluation vis-à-vis de durabilité potentielle de différents indicateurs de durabilité des BFUP testés.....	255
Tableau 6 - 1: Coefficient γ_{cf} relatif au béton fibré en traction	263
Tableau 6 - 2: Coefficient γ_c relatif au béton pour la limite en compression	263

Tableau 6 - 3 : Caractéristiques en compression et en traction du matériau	264
Tableau 6 - 4: Combinaisons fondamentales et valeurs de charge et de moment sollicitant correspondant en phase construction.....	265

INTRODUCTION GENERALE

Les Bétons Ultra Fibrés Performants (BFUP) représentent actuellement la famille de matériaux à matrice cimentaire aux propriétés mécaniques et de durabilité les plus exceptionnelles. En outre, leur capacité autoplaçante à l'état frais offre une excellente qualité de mise en œuvre particulièrement adaptée à la préfabrication. Or, malgré leurs caractéristiques et leurs avantages indéniables, certaines spécificités liées à leurs formulations et à leur production rendent leurs coûts prohibitifs et leur bilan carbone peu satisfaisant, ce qui freine leur essor. Leurs applications résident ainsi très souvent, à ce jour, en quelques « niches » pour lesquelles leurs qualités les rendent indispensables.

Ce projet de thèse s'inscrit dans une stratégie d'optimisation structurelle, environnementale et économique d'éléments de structure préfabriqués de Génie Civil de l'entreprise Lagarrigue (Firmi, Aveyron). Ces éléments sont généralement des pièces massives, de grandes dimensions, pouvant être fortement ferrillées. De plus, le transport d'un grand nombre de ces pièces à travers la France constitue une contrainte forte au niveau du coût et de la production de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, l'utilisation en préfabrication de Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) en substitution des bétons de classe de résistance ordinaire paraît pertinente. Leurs propriétés mécaniques et de durabilité élevées autorisent la conception de structures plus fines et plus élancées avec une réduction importante du volume des matériaux. Le transport de ces pièces allégées peut alors présenter un gain économique et une amélioration du bilan carbone. Une réalisation sur chantier s'appuyant sur la préfabrication est facilitée et rapide, mais elle peut l'être d'autant plus avec des éléments en BFUP, notamment avec la manutention de pièces moins massives. Construire des structures et ouvrages plus légers en BFUP permet également de se passer de fondations surdimensionnées. Grâce à une meilleure durabilité des BFUP, la durée de vie des ouvrages est augmentée, et les frais de maintenance peuvent être fortement atténués. Néanmoins, l'utilisation des BFUP, malgré leurs nombreux atouts, n'est pas forcément rentable par rapport à des solutions plus traditionnelles et leur bilan CO₂ reste négatif. Leur développement nécessite donc un travail de recherche afin de mettre au point des formulations plus économiques et moins énergivores, tout en adaptant dans sa globalité l'ensemble de processus de production des éléments de structure préfabriqués de façon à tirer profit des avantages indéniables que procurent ces matériaux. L'objectif de cette thèse consiste en la mise

au point de formulations de BFUP originales sans traitement thermique, privilégiant l'incorporation de matériaux locaux, dont le métakaolin en tant qu'ultrafine pouzzolanique, et optimisées par rapport à leurs quantités. Ce travail de formulation est couplé à une étude portant sur l'analyse et l'identification des systèmes de production les plus adaptés, allant dans le sens d'une amélioration du bilan économique et écologique de l'ensemble du processus de production pour rendre ainsi la solution BFUP pérenne. Les cartes d'identité des BFUP formulés sont ensuite dressés par rapport au comportement aux états frais et durci, comportement mécanique et durabilité, afin de vérifier qu'ils satisfont les exigences de (AFGC, 2002, 2013) et de la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) et de définir leurs classes. En outre, la confrontation des performances des différents BFUP et l'analyse de leur microstructure doivent également permettre de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de certaines de leur propriétés singulières et d'étudier l'influence des paramètres de formulations. Ces travaux doivent déboucher sur une application industrielle en BFUP pour l'entreprise Lagarrigue.

Dans le premier chapitre bibliographique, nous dressons l'état des connaissances actuel des BFUP, sur leurs formulations, les propriétés à l'état frais et durci, leur durabilité, l'aspect réglementaire, et les ouvrages existants en BFUP. 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. Les valeurs des propriétés mécaniques et de durabilité des BFUP répertoriées dans cette partie constitueront une base de comparaison avec celles obtenues sur les BFUP développés durant notre projet. Ce chapitre s'achèvera avec l'aspect réglementaire et les méthodes de dimensionnement en BFUP, et avec une présentation des types d'ouvrages existants en BFUP et des raisons qui motivent l'utilisation de ces matériaux dans les applications structurales.

Le chapitre 2 décrit l'ensemble de l'étude de formulation des BFUP basée sur le cahier des charges défini en accord avec l'industriel. La mise au point des formulations est divisée en 3 étapes. La première est une étude préliminaire qui traite de la sélection des matériaux les plus appropriés et sa validation. La seconde concerne l'optimisation des BFUP, notamment de leur matrice cimentaire, en vue d'obtenir des formules de bétons originales présentant un bon

compromis entre performances mécaniques et coût de production. La dernière étape consiste à étudier le passage de l'échelle du laboratoire à celle de l'usine de préfabrication, en particulier à travers l'influence du type de malaxeur et des conditions de cure.

Le chapitre 3 présente l'étude du comportement à l'état frais des formulations de BFUP établis durant le chapitre 2. Outre la caractérisation à base d'essais classiques, nous avons mené une étude de rhéologie approfondie notamment sur l'écoulement et la thixotropie, compte tenu du manque de données sur ces propriétés. Cette étude doit permettre d'apporter les éléments de réponse aux questionnements de l'industriel et de proposer des préconisations pour assurer une production et un bétonnage en usine de préfabrication efficace et sans risque.

Le chapitre 4 concerne la caractérisation des propriétés mécaniques instantanées et différées des bétons au cours du temps. Les résultats obtenus seront confrontés à ceux exigés par (AFGC, 2013) et la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) afin de situer et de classer nos bétons. Les travaux réalisés dans cette partie permettront à l'industriel de dresser une « carte d'identité » en termes de performances mécaniques des BFUP produits pour répondre aux appels d'offre. La confrontation des résultats des différents bétons permettra de mettre en évidence l'effet des paramètres de formulations.

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse de la microstructure des pâtes des BFUP et la caractérisation de leur durabilité. L'objectif est de caractériser la microstructure des pâtes et de compléter les cartes d'identité de nos matériaux vis-à-vis de la durabilité et des propriétés de transfert, mais également d'apporter des informations qui pourraient éventuellement confirmer les hypothèses émises lors de l'étude mécanique et du comportement différé, ou permettre de mieux les appréhender.

Une première réalisation d'éléments en BFUP au sein de l'unité de production de Lagarrigue destinés à une application structurale parachèvera ce travail de recherche et sera décrit dans le dernier chapitre. Ces éléments sont des prédalles servant de coffrages perdus dans le cadre des travaux de réhabilitation d'un pont construit en 1898. La note de calcul de leur dimensionnement basée sur les recommandations de (AFGC, 2013) et les prénormes matériaux et calcul BFUP (PR NF P18-470) et (PR NF P18-710) sera présentée.

Ce mémoire s'achèvera sur un bilan de ce projet, avec ses principales conclusions, et sur les perspectives que nous pouvons en dresser.

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Ce chapitre propose une synthèse bibliographique sur les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP). Par rapport aux objectifs de l'étude, cette synthèse s'articule autour de la mise au point des formulations de BFUP, des propriétés à l'état frais et à l'état durci, et des méthodes de dimensionnement des structures en BFUP applicables à l'heure actuelle. Cette bibliographie doit ensuite nous permettre d'orienter le plan d'étude par rapport aux objectifs fixés.

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. Nous nous intéresserons aussi aux spécifications liées à la fabrication de BFUP à l'échelle industrielle.

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.

Outre ces caractéristiques mécaniques considérées comme exceptionnelles, les BFUP ont également la réputation d'avoir une durabilité remarquable. Cet aspect est évalué via les indicateurs généraux de durabilité, comme pour les bétons classiques. La comparaison de leurs valeurs avec celles d'autres types de béton, ainsi que l'exploitation de travaux récents menés sur les propriétés de transfert des BFUP permettra de mieux apprécier leur durabilité.

La quatrième partie de cette synthèse bibliographique traite l'aspect réglementaire avec les recommandations et prénormes concernant ces nouveaux matériaux. Il s'agit de répertorier les méthodes de dimensionnement des éléments de structure en BFUP. Nous détaillerons la méthode de la future norme française calculs en BFUP que nous avons pu mettre en œuvre à travers une application d'éléments préfabriqués qui fera l'objet du dernier chapitre.

La dernière partie présentera les ouvrages en BFUP depuis leur développement jusqu'à l'heure actuelle. Cette partie permettra d'apprécier la valorisation de ce nouveau matériau dans des structures particulières. Cette synthèse doit ensuite nous permettre d'orienter le plan d'étude par rapport aux objectifs fixés.

1.1. Généralités

Les études menées depuis les années 80 sur la formulation et la fabrication des bétons utilisant des additions réactives ainsi que des superplastifiants hauts réducteurs d'eau ont conduit à la mise au point des Bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP). Ces bétons présentent des propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles par rapport aux bétons ordinaires. Cependant, ces bétons ont un comportement fragile aussi bien en compression qu'en traction. Pour y remédier et assurer un comportement ductile, la solution consiste à intégrer des fibres au BUHP qui devient dès lors un Béton Fibré Ultra Performant (BFUP).

Par définition, les BFUP se distinguent des bétons à hautes performances et à très hautes performances par leurs résistances caractéristiques en compression supérieures à 150 MPa à 28 jours ; par l'emploi de fibres qui assurent la non fragilité du matériau ; par leur fort dosage en liant et leur très faible dosage en eau ; et par la sélection particulière des granulats (AFGC, 2002).

Plusieurs BFUP commerciaux existent sur le marché Français :

- les différents produits de la gamme Ductal[®] développés par Lafarge ;
- le BSI[®] développé par Eiffage ;
- le BCV[®] développé par Vinci ;
- le CEMTEC_{multiscale}[®] développé par l'IFSTTAR.

D'autres produits sont en cours de développement au CERIB, ou chez EDF.

La première application en BFUP (Ductal[®]) fut la réalisation de la passerelle piétonne à Sherbrooke (Québec, Canada) en 1997. En 1998, la première application en Ductal[®] en France fut la réalisation des poutrelles de renforcement d'un aéroréfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom. D'autres ouvrages en BFUP ont aussi vu le jour après la publication de la recommandation provisoire de l'AFGC en 2002, tels que la passerelle piétonne Sakata-Mirai au Japon en 2002, celle de la Paix à Séoul en 2004, la passerelle des Anges du pont du Diable à Saint Jean de Fos (Hérault) en 2007, le musée MUCEM à Marseille en 2013, et le stade Jean Bouin à Paris en 2014 pour n'en citer que quelques-uns.

Cependant, malgré les performances mécaniques et la durabilité uniques que présentent les BUHP (avec ou sans fibres), leur utilisation reste à l'heure actuelle restreinte à cause de leurs coûts élevés liés aux forts dosages en constituants onéreux tels que le ciment, la fumée de silice, les fibres métalliques et les superplastifiants.

1.2. Composition des BFUP

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 (AFGC, 2002 et 2013). 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.

1.2.1. Constituants

1.2.1.1. Ciment

Les formulations de Béton Fibrés Ultra Performants (BFUP) se caractérisent par l'emploi d'une grande quantité de ciment allant de 700 kg/m³ (Graybeal, 2007) jusqu'à plus de 1000 kg/m³ (Hajar et al., 2004), (Rossi et al., 2005). Cette quantité considérable de ciment, à laquelle vient s'ajouter aussi des ultrafines, a pour but de diminuer au maximum les vides, et d'augmenter, par conséquent, la compacité du mélange. Selon (Habel, 2004), durant le processus d'hydratation, seulement 30% de cette grande quantité de ciment est hydraté. Les grains de ciment anhydre, de grande surface spécifique et de résistance supérieure à celle des hydrates du ciment (portlandite et C-S-H), jouent donc aussi un rôle de fine en procurant, en complément, au matériau une capacité d'auto-cicatrisation.

Pour ce qui est du type de ciment, le choix se porte généralement sur le CEM I 52,5 PM-ES (Bonneau et al., 1997). Ce type de ciment permet d'obtenir des performances mécaniques élevées de par sa classe 52,5. Contenant une faible teneur en C₃A, il permet aussi de réduire la demande en eau, et donc d'augmenter l'ouvrabilité du BFUP. Malgré les avantages que le CEM I 52,5 PM-ES peut apporter, d'autres types de ciment tels que le CEM II 42,5 et les CEM III ont été utilisés dans la confection de BFUP (Toledo Filho et al., 2012), (Corinaldesi et Moriconi, 2012). Ces ciments peuvent également conduire à des résistances en compression élevées (de 150 MPa à 162 MPa obtenues sur prismes 4x4x16 cm).

1.2.1.2. Granulat

Le granulat préférentiellement utilisé pour les BFUP est en général un sable dit fin de dimension inférieure à 600 μm (Richard et Cheyrezy, 1995), (de Larrard et Sedran, 1994). Il est défini comme un granulat naturel dont le diamètre du plus gros granulat est limité à 4 mm. Plusieurs auteurs (Richard et Cheyrezy, 1995), (de Larrard et Sedran, 1994) 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. Cette réduction des frottements accompagnée d'un faible taux d'absorption d'eau favorise l'ouvrabilité. Malgré ces préconisations, (Holschemacher et al., 2003), (Taфраoui, 2009) et (Yang et al., 2009) ont employé des granulats de dimensions variant de 2 à 16 mm dans la confection de leurs BFUP.

1.2.1.3. Additions pouzzolaniques

Conformément à la norme (NF EN 206, 2014), toutes les additions présentant une finesse supérieure à celle du ciment peuvent être utilisées en substitution d'une partie du ciment. Concernant le BFUP, les additions les plus utilisées sont : la fumée de silice, le quartz broyé, et, plus récemment, le métakaolin (Taфраoui, 2009). Les additions ont trois fonctions essentielles dans la matrice cimentaire du BFUP : par effet filler, elles combler les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable ; elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pouzzolanique.

1.2.1.3.1. Fumée de silice

Ultrafine hautement pouzzolanique composée de particules sphériques de dioxyde de silicium amorphe, de diamètre moyen de l'ordre de 0,1 μm , avec une très grande surface spécifique, elle est le coproduit recueilli sur des filtres au cours du processus de fusion destiné à la production du silicium métal et des alliages de ferrosilicium. L'incorporation de fumée de silice dans le béton permet d'améliorer la résistance en compression en réagissant avec l'hydroxyde de calcium (portlandite CH), pour former des hydrates de type silicates de calcium hydratés (C-S-H) plus résistants. Le dosage en fumée de silice utilisé en substitution partielle de ciment dans la fabrication des BFUP est de 10 à 30% par rapport à la masse de ciment. (Parant, 2003) et (Wille et al., 2012) ont montré que le pourcentage optimal de substitution en masse de ciment est de 25%.

Son utilisation doit aussi être conforme à la norme (NF EN 13263-1, 2009). En pratique, elle est souvent incorporée dans des bétons qui demandent une résistance mécanique à 28 jours élevée tels que les BFUP. En raison de cette qualité, cette ultrafine est de plus en plus recherchée, alors que sa disponibilité est limitée par la capacité de production des industries du silicium, ce qui entraîne donc une augmentation de son prix.

1.2.1.3.2. Quartz broyé

Le quartz broyé est une poudre de diamètre moyen compris entre 10 et 15 μm , issue du broyage d'un sable très riche en silice ($\text{SiO}_2 > 98\%$) généralement utilisé dans la fabrication du verre. Selon (Richard et Cheyrezy, 1995), le quartz broyé est indispensable pour les traitements thermiques, que nous expliciterons ultérieurement, d'un BPR (Béton de Poudres Réactives assimilable aux BUHP). La réactivité optimale est obtenue avec une taille maximale des grains comprise entre 5 et 25 μm . La quantité utilisée en substitution correspond à un rapport stœchiométrique optimal afin de convertir les hydrates amorphes en tobermorite qui se caractérise par un rapport molaire C/S de 0,83. Ceci correspond à un rapport silice/ciment de 0,62 (Richard et Cheyrezy, 1995). Une étude de (Tafraoui, 2009) a montré que l'ajout de quartz broyé dans les BFUP traité thermiquement ne conduit pas à une augmentation significative des résistances à la flexion (+2,6%) mais favorise remarquablement les résistances en compression (+8,2%), grâce à l'apparition de nouvelles phases hydratées sous haute température.

1.2.1.3.3. Métakaolin

Le métakaolin résulte de la calcination à 600-800°C d'une argile, la kaolinite. Il est essentiellement formé d'oxydes d'aluminium et de silicium ($\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2$ ou AS_2), dont le diamètre moyen est de l'ordre de 28 μm . La morphologie du métakaolin est de type feuillets hexagonaux, accolés les uns aux autres. Cette ultrafine a fait l'objet d'une norme nationale produit (NF P18-513, 2012) et a été intégrée dans l'annexe nationale de la norme béton vis-à-vis de son utilisation (NF EN 206, 2014). Depuis, le métakaolin peut être utilisé dans le béton en substitution partielle du ciment en tant qu'addition de type II (avec un coefficient de prise en compte de 1) afin d'améliorer les performances mécaniques des bétons durcis grâce à son pouvoir pouzzolanique élevé. En effet, il se combine avec la portlandite (CH) pour former les hydrates siliceux (C-S-H) ou silico-alumineux (C-A-S-H). La réaction pouzzolanique du métakaolin est présentée via l'équation (1 - 1).



Il est important de noter que le complexe $C_5AS_2H_{10}$ est un composé moyen formé de silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de silico-aluminates de calcium hydratés. Il a été montré que les hydrates formés dépendent du rapport CH/AS₂ selon les équations écrites dans le Tableau 1 - 1 (Kinuthia et al., 2000), (Murat et al., 1983).

Tableau 1 - 1: Hydrates formés en fonction du rapport CH/AS₂ (Murat et Bachiorrini, 1982)

Rapport CH/AS ₂	Réactions pouzzolanique
1	$AS_2 + 3CH + 6H \rightarrow C_2ASH_8 + C - S - H$
1,67	$AS_2 + 5CH + 3H \rightarrow C_2AH_6 + 2C - S - H$
2	$AS_2 + 6CH + 9H \rightarrow C_2AH_{13} + 2C - S - H$

Il est important de noter que certains de ces hydrates ne sont pas stables au cours du temps comme les gels silico-calciques. (De Silva et Glasser, 1993) et (Garcia-Diaz, 1995) ont proposé une classification des hydrates stables soit en fonction du temps, soit en fonction du ratio CH/AS₂ dans le Tableau 1 - 2.

Tableau 1 - 2 : Les hydrates formés en fonction du temps (Garcia-Diaz, 1995) et du rapport CH/AS₂ (De Silva et Glasser, 1993)

Hydrates stables en fonction du temps (Garcia-Diaz, 1995)			
Echéances (jours)	< 7 jours	7 < jours < 28	jours > 28
Hydrates formés avec un rapport CH/AS ₂ >7	C ₄ ASH ₁₃ , C ₂ SH _y	C ₂ ASH ₈ , C ₂ SH _y	C ₃ AS _{0,3} H _{5,4} , C ₂ SH _y
Hydrates stables en fonction du ratio CH/AS ₂ (De Silva et Glasser, 1993)			
Rapport CH/AS ₂	0,4 < CH/AS ₂ < 1,5	1,75 < CH/AS ₂ < 6	
Hydrates stables à 90 jours	C ₂ ASH ₈ , C-S-H	C ₂ ASH ₈ , C-S-H, et traces de C ₄ ASH ₁₃	

D'après ce Tableau 1 - 2, lorsque le rapport CH/AS₂ est supérieur à 7, les hydrates formés à long terme (plus de 28 jours) sont essentiellement des gels silico calciques et des aluminates tétracalciques hydratés. Si le rapport CH/AS₂ est compris entre 0,4 et 1,5, les hydrates formés sont des gels silico calciques (C-S-H) et de la stratlingite (C₂ASH₈). Si ce rapport est compris entre 1,75 et 6, en plus des hydrates courants (C-S-H et C₂ASH₈), il peut y avoir des traces d'aluminates tétracalciques hydratés (C₄ASH₁₃). Parmi ces hydrates formés, les C-S-H sont les plus résistants, et ils contribuent à l'amélioration des performances mécaniques du matériau.

Selon (Kinuthia et al., 2000), le métakaolin contribue à l'amélioration des résistances mécaniques des bétons grâce à trois effets : effet filler, effet d'accélération des réactions

d'hydratation du ciment par germination, et effet pouzzolanique par consommation de la portlandite.

En ce qui concerne l'utilisation du métakaolin dans les BFUP, (Rougeau et Borys, 2004) ont réalisé une étude de formulation à base de métakaolin de ce type de béton. Ces études ont montré que l'utilisation du métakaolin en substitution totale de la fumée de silice permet d'obtenir des résistances en compression prometteuses. Des valeurs moyennes de 155 MPa et de 175 MPa ont été obtenues sur des éprouvettes 4x4x16 cm respectivement à 28 et 90 jours. Des résultats semblables ont été obtenus dans l'étude de (Tafraoui, 2009) qui a montré que la substitution totale de la fumée de silice par le métakaolin présente peu de variation en termes de performances mécaniques. Il a observé une légère augmentation de la résistance en flexion (+2,6%) et une baisse de la résistance en compression (-6,7%) sur un de ses BUHP avec métakaolin par rapport à des formules équivalentes à base de fumée de silice.

En ce qui concerne le pourcentage de substitution du ciment par cette ultrafine, l'optimum se trouve à 20% en masse de ciment pour les bétons classiques d'après (Wild et Khatib, 1997). Ce taux optimal dépend de la finesse de ciment. Il est important de préciser qu'un excès de métakaolin dans la matrice cimentaire, que l'on pourrait considérer comme une phase inerte en l'absence de portlandite, ne contribuerait pas à la résistance du matériau. De plus, cela tendrait à diminuer la compacité du squelette granulaire par effet de floculation, entraînant ainsi des effets néfastes sur l'empilement granulaire (San Nicolas, 2011).

1.2.1.4. 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 (Richard et Cheyrezy, 1995). 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. Les grains de ciment anhydre sont plus résistants que les principaux hydrates du ciment (la portlandite ou les gels silico-calciques). Ainsi, ils peuvent contribuer à l'augmentation des performances mécaniques et confèrent au matériau une capacité d'auto-cicatrisation en présence d'eau.

1.2.1.5. Superplastifiant

Compte tenu des très faibles rapports Eau/Liant des BFUP, la quantité d'eau est insuffisante pour obtenir une maniabilité correcte permettant une bonne mise en œuvre de ces

bétons. L'emploi d'adjuvants de la famille des superplastifiants, généralement hauts réducteurs d'eau, est donc indispensable pour fluidifier le mélange, mais aussi pour disperser les grains. Ce sont généralement des superplastifiants de troisième génération de type phosphonate et/ou polycarboxylate modifié. Ils permettent de réduire la teneur en eau tout en conservant, voire en améliorant la maniabilité des BFUP. Le dosage en adjuvant est élevé, autour de 5% de la masse de ciment, et peut varier selon les types de superplastifiant et de ciment utilisés. Ce dosage est supérieur à celui des bétons ordinaires, qui est de 0,5 à 1% de la masse de ciment. Il est nécessaire de réaliser une étude d'optimisation du dosage et de compatibilité liant/adjuvant afin d'éviter les problèmes tels que le retard de prise, la ségrégation, le ressuage, qui peuvent entraîner des diminutions des résistances mécaniques.

1.2.1.6. Fibres

Les fibres sont ajoutées aux bétons pour augmenter la résistance à la traction et apporter un caractère ductile aux bétons fragiles par nature. En général, les fibres métalliques, synthétiques, de verre ou végétales peuvent être incorporées dans le béton. En ce qui concerne les BFUP, elles peuvent être de nature métallique ou organique. Le choix se fait en fonction du type d'application visée. En effet, la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) préconise l'utilisation des fibres métalliques pour les BFUP structuraux, et les fibres synthétiques dans le cas de BFUP non structuraux. Par rapport à nos objectifs de formuler des BFUP structuraux, nous traitons ici uniquement le cas des fibres métalliques.

Les géométries des fibres, très variables comme le montre la Figure 1 - 1, doivent permettre une bonne adhérence avec la matrice cimentaire, de manière à améliorer leur ancrage, et ainsi le comportement post-fissuration et la ductilité du BFUP. Les fibres métalliques ont généralement une forme cylindrique et droite. La longueur des fibres varie entre 3 et 20 mm, avec un diamètre entre 30 et 250 μm (Rougeau et al., 2000). Les fibres de module d'élasticité élevé, droites et lisses de 13 mm de longueur et de 0,2 mm de diamètre sont souvent utilisées. Mais il existe également celles à crochets et torsadées qui assurent un meilleur ancrage et une dissipation de l'énergie de fissuration plus importante grâce aux frottements à l'interface fibres-matrice (Chanvillard et Aïtcin, 1996), (Wille et al., 2014). Cependant, l'utilisation de ces deux derniers types de fibres peut favoriser la formation d'oursins (pelotes de fibres) durant le malaxage entraînant une répartition non homogène dans le béton (Wille et al., 2012).

Concernant le dosage volumique en fibres des BFUP, il peut varier de 2 à 11%, ce qui correspond à environ 160 à 856 kg/m³. D'après (Yang et al., 2009), un dosage en fibres de 2% volumique procure un rapport performances mécaniques/prix optimal. Selon des recommandations récentes (AFGC 2013 et PR NF P18-470), la teneur volumique minimale en fibres garantissant la non-fragilité du matériau doit être équivalente ou supérieure à 2%.

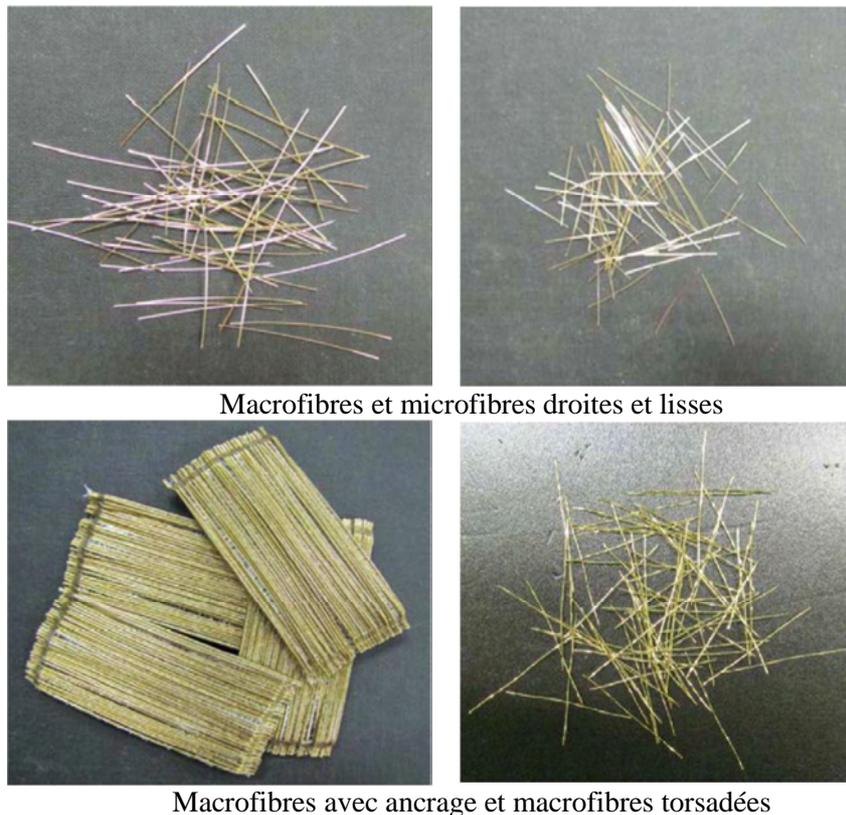


Figure 1 - 1: Photographies illustrant les différents types des fibres métalliques pouvant être incorporées dans les BFUP

L'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire, de par leur géométrie et leur dosage, peut avoir des impacts négatifs sur le comportement à l'état frais et la mise en œuvre, et par conséquent, altérer les performances à l'état durci. Le rapport longueur/diamètre des fibres (L_f/d_f) joue ainsi un rôle important dans la maniabilité des BFUP. (Rossi et al., 1995) a montré que, pour un dosage en fibres donné, plus ce rapport est grand et plus la maniabilité est mauvaise, avec un risque accru de formation de pelotes de fibres au sein de la matrice. Ainsi, la maniabilité du mélange est diminuée lorsque le rapport longueur/diamètre augmente. Si l'on synthétise ces principes, il convient, pour maintenir une maniabilité correcte, d'utiliser soit un dosage important de fibres courtes, soit un faible dosage en fibres longues.

1.2.2. 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 fumée de silice ou éventuellement d'une autre ultrafine telle que le métakaolin, 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 (Richard et Cheyrezy, 1995), et (De Larrard et Sedran, 1994) 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.

(Wille et al., 2012) ont proposé une méthode expérimentale d'optimisation de la matrice de BFUP en se basant sur les mesures d'étalement et de l'air occlus. Il est connu que la résistance en compression dépend non seulement du rapport Eau/Ciment (E/C), mais également de la teneur en air occlus. Les relations entre la teneur en air occlus et les valeurs

d'étalement, et entre la teneur en air occlus et la résistance en compression sont montrées sur la Figure 1 - 2.

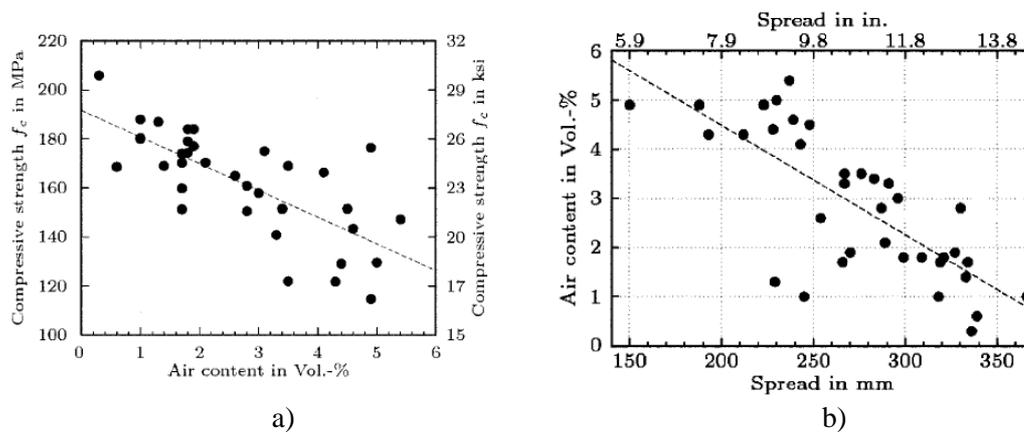


Figure 1 - 2: a) Relation entre la résistance en compression et la teneur en air occlus ; b) Relation entre l'étalement et l'air occlus selon (Wille et al., 2012)

Sur la Figure 1 - 2a, les résistances en compression élevées sont obtenues pour un pourcentage en air occlus inférieur à 2%. La Figure 1 - 2b montre de faibles teneurs en air occlus lorsque l'étalement varie entre 250 mm et 350 mm. Ainsi, ces résultats mettent en évidence le lien étroit entre comportement à l'état frais et résistance mécanique. Si le matériau présente une faible maniabilité caractérisée par un étalement réduit, il peut entraîner et piéger, probablement du fait de sa viscosité élevée, une quantité significative d'air occlus qui affecte sa résistance en compression.

L'ajout de fibres peut influencer la compacité du mélange de manière non négligeable. (Rossi, 1998) a montré que la perturbation exercée par les fibres sur l'arrangement granulaire augmente avec leur longueur. Si des fibres suffisamment courtes sont insérées dans un mélange granulaire, elles peuvent pénétrer dans un interstice de gros grains sans perturber la compacité réelle. Pour un mélange dont l'étendue granulaire est rapprochée, l'influence des fibres sur chaque grain dépend du rapport entre la longueur des fibres et le diamètre du grain. Si ce rapport est grand, l'arrangement du mélange est peu perturbé par la présence de fibres (De Larrard et Sedran, 1999).

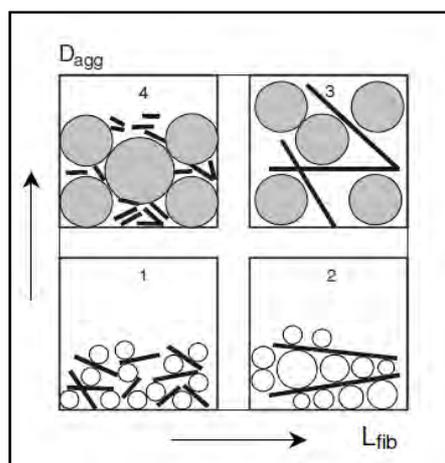


Figure 1 - 3 : Influence de fibres de différentes longueurs et de grains de différentes tailles sur la compacité du mélange selon (De Larrard et Sedran, 1999)

La Figure 1 - 3 représente les interactions qui existent entre les fibres de différentes longueurs et les grains de différentes tailles et leur effet sur la compacité du mélange :

- lorsqu'on associe deux diamètres de grains réduits par rapport à la longueur des fibres (cas 2), les grains les plus petits peuvent remplir les vides autour des fibres longues. Si le mélange contient deux types de granulats de tailles plus grandes que la longueur des fibres (cas 4), ces dernières peuvent se placer dans le squelette granulaire sans créer de perturbation significative. Ces deux configurations permettent d'obtenir les meilleures compacités.
- les mélanges 1 et 3 sont les plus défavorables pour l'empilement granulaire. En effet, ces mélanges contiennent davantage d'espaces vides que les autres cas, car ils associent des tailles de granulat et des longueurs de fibres assez comparables. Combler ce surplus de porosité nécessite dès lors un supplément de fines (ciment+addition).

L'étude a montré également que l'association de deux types de fibres, microfibres et macrofibres, diminue fortement la compacité du mélange. Il est important de noter que la teneur en fibres dans le mélange influe également sur la compacité du mélange. De plus, les fibres constituent une part prépondérante du coût du produit BFUP.

1.2.3. Exemple de formulations

Les formulations types des BFUP sont généralement établies empiriquement, en s'appuyant sur quelques principes que nous venons d'exposer. Le premier chantier en BFUP fut la réalisation d'une passerelle piétonne à Sherbrooke (Canada) en 1997. La composition de ces bétons est détaillée dans le Tableau 1 - 3.

Tableau 1 - 3: BUHP et BFUP utilisés pour la construction d'une passerelle à Sherbrooke au Canada (Aïtcin et al., 1998)

	Ciment	Fumée de silice	Quartz broyé	Fibres métalliques	Sable	Adjuvant	E/C	f_{cm28} (MPa)
Sans fibres (kg/m ³)	750	230	210	-	1010	45	0,28	163
Avec fibres (kg/m ³)	695	225	210	200	990	45	0,28	217

Nous pouvons constater que ces bétons, avec ou sans fibres, emploient une grande quantité de liant (de 920 à 980 kg/m³). Le quartz broyé est utilisé en combinaison avec le traitement thermique à haute température à 90°C pour accroître la résistance en compression. Le rapport E/C est réduit à une valeur de 0,28, ce qui justifie un dosage important en superplastifiant. Ces bétons ont atteint une résistance en compression de 163 MPa sans fibres et 217 MPa avec 2,5% de fibres en volumique.

Il existe de nombreux BFUP commercialisés tels que Ductal[®] de Lafarge, BSI[®] de Bouygues, BCV[®] d'Eiffage, et le CEMTEC[®] de l'IFSTTAR, employés sur des ouvrages exceptionnels pour lesquels ils sont sans concurrence. Leur usage pour des structures plus courantes est limité par leurs coûts élevés liés aux forts dosages en composants onéreux (fumée de silice, ciment, granulats spécifiques, fibres métalliques, et superplastifiant). A titre d'exemple, nous présentons la composition de BFUP provenant de différents fournisseurs dans le Tableau 1 - 4. Ces BFUP sont commercialisés sous forme de pré-mélange, l'utilisateur s'engageant à respecter les consignes des fournisseurs vis-à-vis de la procédure de malaxage et de traitement thermique si nécessaire, ainsi que de la teneur en eau, en adjuvant, et en fibres afin de garantir les performances du produit final.

Tableau 1 - 4 : Composition de différents BFUP : Ductal[®] (Graybeal, 2007), BSI[®] (Hajar et al., 2004) et CEMTEC[®] (Rossi et al., 2005)

	Ductal [®]	BSI [®]	CEMTEC [®]	
Prémix (kg/m ³)	Ciment CEMI 52,5R	712	1114	1050
	Fumée de silice	231	169	268
	Quartz broyé	211	-	-
	Sable fin (100-300 µm)	1020	-	514
	Agrégats (0-6 mm)	-	1072	-
Adjuvants	60,7	40	44	
Fibres métalliques	156	234	858	
Pourcentage volumique de fibres (%)	2	3	11	
Traitement thermique à 90°C	oui	non	non	
Rapport E/C	0,2	0,19	0,2	

Globalement, ces bétons incorporent une quantité élevée de ciment, en particulier dans le cas des BFUP sans traitement thermique à haute température. Dans le cas du Ductal[®], nous pouvons noter une teneur inférieure en ciment par rapport au BSI[®] et au CEMTEC[®], les résistances mécaniques élevées étant obtenues grâce à l'application d'un traitement thermique à 90°C. La fumée de silice est utilisée dans les trois produits cités, à une teneur de 15 à 32% de la masse de ciment. La teneur volumique en fibres est de 2 à 11%. Le rapport eau/ciment est réduit à une valeur de 0,19 à 0,2, ce qui justifie l'utilisation d'une grande quantité de superplastifiant pour maintenir l'ouvrabilité. Enfin, les sables fins sont privilégiés dans le cas du Ductal[®] et du CEMTEC[®], tandis que les agrégats de dimensions supérieures 0-6mm sont incorporés dans le BSI[®].

1.2.4. Coût de l'emploi des BFUP

Une comparaison des coûts approximatifs calculés en 2000 et à l'heure actuelle (2015) des matières premières les plus utilisées dans les BFUP est proposée dans le Tableau 1 - 5.

Tableau 1 - 5 : Prix approximatifs des matières premières pour les BFUP en 2000 (Rougeau et al., 2000) et à l'heure actuelle

Matières	Prix en 2000 (€)	Prix actuel (€)
Ciment CEM 1 52,5 PMES	106€/tonne	160€/tonne
Fumée de silice	182€/tonne	500€/tonne
Métakaolin	-	100€/tonne
Quartz broyé	68€/tonne	68€/tonne
Sable siliceux	18€/tonne	23€/tonne
Superplastifiant	1,07€/kg	2,5€/kg
Fibres métalliques	3,66€/kg	2€/kg

Nous pouvons constater une variation de prix des matériaux entre 2000 et 2015, et en particulier une augmentation significative du coût du ciment, de la fumée de silice, et du

superplastifiant. En revanche, nous pouvons relever une diminution du prix des fibres métalliques.

Le coût matériaux par m³ de BFUP à l'heure actuelle peut être ainsi estimé comme le montre le Tableau 1 - 6. A ce coût matériaux, il faut très souvent ajouter le coût de l'énergie nécessaire à la production, notamment dans le cas de l'application d'un traitement thermique.

Tableau 1 - 6 : Estimation du coût lié à la matière première des BFUP en 2015

Constituants	Prix (€)	BFUP avec fumée de silice (BSI®)		BFUP avec fumée de silice (Ductal®)	
		kg/m ³	€	kg/m ³	€
Ciment CEM 1 52,5 PM ES	160€/tonne	1114	178	712	113,9
Fumée de silice	500€/tonne	169	84,5	231	115,5
Métakaolin	100€/tonne	-	-	-	-
Quartz broyé	68€/tonne	-	-	211	14,3
Sable de quartz	23€/tonne	1072	24,6	1020	23,5
Superplastifiant	2,5€/kg	40	100	60	150
Fibres métalliques	2€/kg	234	468	156	312
Coût total / m³ (€)		855		769	

Ces coûts sont bien plus élevés que ceux des bétons ordinaires qui peuvent être estimés à environ 60 €/m³. Néanmoins, les avantages économiques de l'utilisation des BFUP résident en la capacité de réaliser des structures plus fines et plus élancées avec une réduction importante du volume de matériau. Le transport de ces pièces plus légères peut présenter un gain en termes de coût et de bilan carbone. Avec les structures plus légères en BFUP, il est possible également de réduire la masse totale l'ouvrage et donc ses fondations. De plus, grâce à une meilleure durabilité des BFUP, la durée de vie des ouvrages est augmentée, et le coût de maintenance peut être fortement atténué. On comprend donc qu'il faut une vision globale allant de la phase de conception et construction à la phase service de la structure pour établir un bilan économique qui soit le plus objectif et précis possible, et non pas se limiter au le seul prix des matériaux.

Pour réduire les coûts liés à la matière première des BFUP, il est envisageable d'utiliser d'autres fines que la fumée de silice, comme le métakaolin par exemple. Les études de (Rougeau et Borys, 2004), et de (Tafraoui et al., 2009) ont démontré cette possibilité.

1.2.5. Fabrication des BFUP

1.2.5.1. Fabrication au laboratoire

La fabrication des BFUP nécessite une procédure de malaxage et un type de malaxeur spécifiques. Les études concernant la séquence de malaxage des BFUP sont rares. Une étude approfondie de (Cazacliu et al., 2006) s'est intéressée à la problématique de malaxage d'un BFUP.

Pour choisir le type de malaxeur, il faut privilégier les malaxeurs à fort gradient de cisaillement qui possèdent un grand pouvoir dispersant tel que le malaxeur EIRICH R08W (Figure 1 - 4) conseillé par (Cazacliu et al., 2006). Cependant, (Bonneau et al., 1997) a montré qu'il est possible de fabriquer un BFUP avec un malaxeur pour bétons ordinaires à volume réduit, environ la moitié de la capacité maximale à l'échelle industrielle.

Un protocole de fabrication a été établi par (Cazacliu et al., 2006) avec l'utilisation du malaxeur EIRICH R08W permettant d'obtenir une bonne ouvrabilité :

- pré-malaxage des matériaux secs pendant 1 minute ;
- ajout de l'eau et du superplastifiant, le superplastifiant étant mélangé avec de l'eau ;
- malaxage humide pendant 5 minutes à vitesse rapide (4,17 tours/s) ;
- introduction de fibres, puis malaxage pendant 1,5 minute.



Figure 1 - 4 : Malaxeur EIRICH R08W

Selon cette étude, le temps de malaxage est un des paramètres dominants qui influent sur les propriétés mécaniques du béton. Un malaxage humide de cinq minutes est suffisant pour que la matrice atteigne les propriétés mécaniques optimales. Le prolongement excessif du

malaxage avec les fibres entraîne une augmentation de la teneur en air et donc une chute des propriétés mécaniques du béton durci. Il est important de noter que l'introduction de fibres avant la phase liquide (pré-malaxage avec d'autres constituants) provoque une diminution des propriétés d'écoulement, un entraînement d'air, et une baisse de la résistance en compression et du module élastique. Ils préconisent donc l'incorporation des fibres dans une dernière étape de la séquence de malaxage. Le temps de malaxage total obtenu avec ce malaxeur est de 8 minutes environ. Ce dernier peut devenir très long, de 18 à 20 minutes, dans le cas d'utilisation d'un malaxeur conventionnel pour bétons ordinaires, pouvant entraîner une situation de reprise de bétonnage dans le cas de coulages successifs pour la confection de pièces de grand volume.

1.2.5.2. Fabrication en usine

A l'heure actuelle, les seuls BFUP réalisés en usine sont des BFUP commercialisés tels que Ductal[®] et BSI[®], qui ne sont pas formulés par les entreprises qui les fabriquent. L'approvisionnement de la matière première se fait sous forme de Prémix, c'est-à-dire un pré-mélange à sec, comme pour le Ductal[®] commercialisé par Lafarge. La fabrication à base du Prémix ne pose en général pas de difficultés grâce à l'utilisation des malaxeurs spécifiques comme ceux de la marque EIRICH existant sur le marché. Cependant, (AFGC, 2002) préconise une tolérance de $\pm 2\%$ concernant les matériels de pesage des constituants, en particulier la pesée de l'eau et du superplastifiant qui sont des paramètres qui conditionnent directement les performances du béton durci.

Pour la fabrication des BFUP hors Prémix, (AFGC, 2013) préconise de réaliser régulièrement des mesures de la teneur en eau des granulats pour permettre la correction des quantités d'eau à introduire. Généralement, dans les centrales à béton ou les usines de préfabrication, les trémies des sables sont équipées de sondes d'hygrométrie qui relèvent la teneur en eau régulièrement durant la fabrication afin de garantir une bonne correction de la quantité d'eau de gâchage. Concernant le pesage des matières premières, pour un malaxeur de capacité (C) en m³, selon (AFGC, 2002, 2013), les portées des balances doivent être inférieures à :

- pesée de fumée de silice (séparément) : 0,1C
- pesée d'autre addition (séparément) : 0,15C
- pesée de ciment et une ou plusieurs additions (simultanément) : 0,6C

En fonction du volume de béton à fabriquer, il est nécessaire d'organiser le processus de bétonnage en prenant en compte le temps de fabrication du béton, qui peut être de 15 à 20 minutes selon la composition du mélange et le type de malaxeur utilisé. Ce temps est relativement long par rapport celui des bétons traditionnels qui est plutôt de l'ordre de 1 à 3 minutes. Il est donc conseillé de réaliser une étude approfondie à l'état frais du BFUP formulé afin d'anticiper la reprise de bétonnage.

1.2.5.3. Mise en œuvre

Selon (AFGC, 2013), la mise en œuvre des BFUP peut se faire avec ou sans vibration, ceci dépend de sa consistance et de sa fluidité. Il faut toutefois éviter les hauteurs de chute supérieures à 0,5 m. Dans le cas contraire, il faut justifier par une étude de la faisabilité vis-à-vis des fibres (absence de ségrégation et/ou formation d'oursin). Il est également recommandé d'effectuer des coulages continus pour réduire le phénomène de dessiccation entre les couches (AFGC, 2013). Pour le bétonnage par temps froid, les recommandations pour les bétons classiques s'appliquent aux BFUP. C'est-à-dire que, lorsque la température est inférieure à +5°C, tout bétonnage est déconseillé, sauf dispositions particulières (AFGC, 2013) :

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

Les corps d'épreuves doivent être confectionnés afin de valider les performances mécaniques au jeune âge avant le décoffrage, à l'instant du levage des pièces, et à long terme. Enfin, la cure des BFUP est systématique et doit être soignée afin d'empêcher la dessiccation du béton avant sa prise, et sa microfissuration pendant la prise (AFGC, 2013).

1.2.5.4. Cure et traitement thermique

La cure consiste à protéger le béton contre le séchage au jeune âge afin d'assurer l'obtention des propriétés escomptées (résistances mécaniques et résistance aux agressions environnementales). Pour les BFUP, la cure est systématique et doit être soignée pour garantir les propriétés requises. Deux types de cure peuvent être distingués, à savoir une cure humide selon la norme (NF EN 13670, 2013) et une cure thermique, que l'on appelle traitement thermique (TT).

La cure humide consiste à maintenir les éléments fabriqués dans une ambiance humide à humidité relative (HR) de $95\pm 5\%$ et à une température de $20\pm 2^\circ\text{C}$. Ces conditions favorisent le bon développement des performances mécaniques (EN 12390-2, 2009).

Le processus de traitement thermique consiste à porter le béton à une température relativement élevée pendant plusieurs heures. Il existe deux types de traitement thermique pour les BFUP selon (AFGC, 2013) :

- le traitement thermique de type I à température modérée, c'est-à-dire inférieure à 65°C , et qui correspond à une cure thermique décrite dans la norme (NF EN 13369, 2013), a pour but d'accélérer, par activation thermique, les réactions d'hydratation et la prise. Il est appliqué rapidement dans les premières heures qui suivent la mise en œuvre, c'est-à-dire à l'état frais pendant une durée de 12 heures (PR NF P18-470).
- le traitement thermique de type II, à une température de 90°C et à une humidité relative proche de la saturation ($95\pm 5\%HR$), est appliqué aux bétons après la prise pendant quelques dizaines d'heures (PR NF P18-470). Ce traitement thermique de type II a pour but de développer de nouveaux hydrates afin d'augmenter les résistances mécaniques. Les études de (Richard and Cheyrezy, 1995) ont montré que les BFUP ayant subi un traitement thermique de type II présentent une augmentation de 26% de la résistance en compression. Ceci peut s'expliquer par le changement de la nature cristalline des hydrates avec la température. Le diagramme de (Verbeck et Copeland, 1972) décrit les différentes phases de C-S-H et d'hydrates formées en fonction de la température appliquée et du rapport molaire CaO/SiO_2 , noté C/S, sur la Figure 1 - 5.

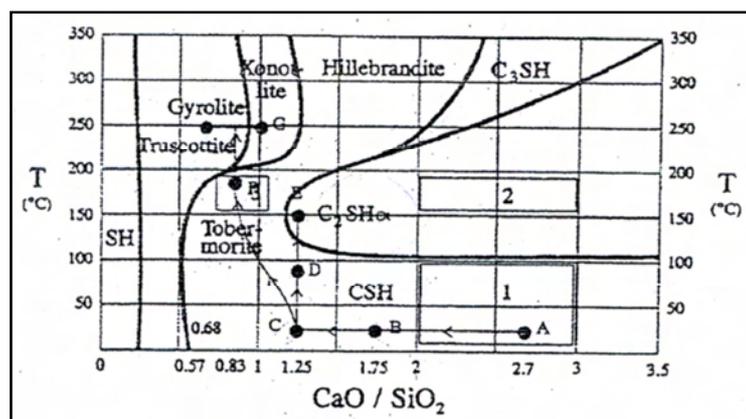


Figure 1 - 5: Diagramme de phase des C-S-H de (Verbeck et Copeland, 1972)

Les hydrates présentant des propriétés mécaniques élevées sont de type tobermorite et xonolite. La réduction du rapport C/S à une valeur de 1 par l'ajout de fumée de silice et de quartz broyé et l'élévation de température jusqu'à 250°C permettent d'atteindre la zone de formation de xonolite. Lorsque ce rapport est réduit jusqu'à 0,83, la formation de tobermorite est possible à une température de 200°C environ. Il faut toutefois éviter la formation des hydrates de type C_2SH_α car ils présentent des propriétés mécaniques médiocres (Taylor, 1990).

1.3. Propriétés des BFUP

Nous présentons dans cette partie une synthèse bibliographique des propriétés à l'état frais et à l'état durci des BFUP. Premièrement, nous décrivons l'état des connaissances du comportement à l'état frais des BFUP afin de prendre en compte les conditions de mise en œuvre, notamment en usine. Dans un second temps, les propriétés à l'état durci des BFUP sont détaillées. Il s'agit d'une description des caractéristiques mécaniques instantanées et différées des BFUP, ainsi que les paramètres qui influencent leurs comportements.

1.3.1. Propriétés à l'état frais

Généralement les BFUP sont autoplaçants et l'étalement au cône est utilisé comme indicateur pour évaluer sa maniabilité. Cette valeur obtenue au cône ASTM (ASTM C230/230M) est comprise entre 250 mm et 300 mm pour la gamme de Ductal®. (Wille et al., 2012) a montré que, pour une valeur d'étalement comprise entre 200 mm et 370 mm (la fourchette recommandée comprise entre 250 mm et 300 mm), la mise en place du béton ne pose pas de difficultés. A l'échelle industrielle, la caractérisation de la maniabilité des BFUP

peut être basée sur les essais d'étalement au cône d'Abrams conformément à la norme (NF EN 12350-8, 2010) ou au cône ASTM (ASTM C230/230M) (PR NF P18-470).

La prénorme (PR NF P18-470) propose de classer les BFUP selon leur consistance à l'état frais. Trois classes de consistance ont été proposées selon la valeur et la méthode d'essai utilisées :

- Ca : les BFUP qui appartiennent à cette classe sont susceptibles d'être autoplaçant, la mise en place se fait sans vibration, ni aide mécanique à l'écoulement.
- Cv : les BFUP qui appartiennent à cette classe sont visqueux, la mise en place se fait sans vibration, mais nécessite une aide mécanique à l'écoulement.
- Ct : les BFUP qui appartiennent à cette classe sont thixotropes, c'est-à-dire généralement susceptibles de s'écouler sous l'effet d'un cisaillement dynamique, mais la surface libre au repos est susceptible de tenir une pente.

Dans le cas d'essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8, 2010), selon la valeur d'étalement obtenue, un classement à l'état frais est proposé (Tableau 1 - 7).

Tableau 1 - 7: Classement des BFUP à l'état frais selon sa consistance (PR NF P18-470)

Valeur d'étalement au cône d'Abrams (mm)	Classement
≥ 760	Ca
$660 \leq \text{étalement} < 760$	Cv
< 660	Ct
Ca : bétons autoplaçants Cv : bétons visqueux Ct : bétons thixotrope	

Selon (Bonneau et Vernet, 1998), les facteurs qui influencent la rhéologie des BFUP sont la composition du mélange, le temps de malaxage, et le dosage optimal de superplastifiant. Une étude de (Markovic, 2006) a montré que la maniabilité à l'état frais du BFUP dépend à la fois de la concentration de fibres et de la taille des granulats en supposant que les autres paramètres restent identiques.

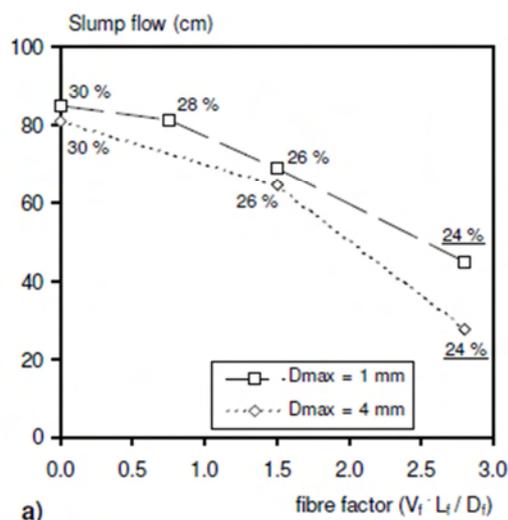


Figure 1 - 6 : Influence de la teneur en fibres courtes ($l/d=6/0,16$) sur l'étalement de BFUP avec 2 types de granulats (Markovic, 2006)

La Figure 1 - 6 représente l'évolution de l'étalement de deux BFUP confectionnés avec deux classes granulaires et avec différentes concentrations de fibres courtes de 6 mm de longueur et de 0,16 mm de diamètre. Lorsque ces BFUP contiennent une même quantité de fibres, l'étalement du BFUP utilisant le sable de classe granulaire 0-1mm est supérieur à celui composé du sable de classe granulaire 0-4 mm. Cet écart est encore plus significatif lorsque le facteur de fibres dépasse 1,5, ce qui correspond à un dosage volumique de 4% de fibres. Cette étude met en évidence deux phénomènes :

- l'incorporation de fibres diminue la maniabilité du mélange.
- l'augmentation de la taille du plus gros granulat contribue également à la perte de maniabilité.

Pour caractériser finement le comportement rhéologique à l'état frais des BFUP, les mesures au rhéomètre sont réalisées. Ces essais permettent d'obtenir deux paramètres rhéologiques qui sont la viscosité plastique et le seuil de cisaillement. Le principe de l'essai consiste à mesurer le couple développé pour une plage de vitesse de rotation d'un mobile qui est lui-même immergé dans le béton. A partir de l'exploitation des résultats de ces essais, on peut déduire le type de comportement rhéologique. (Bonneau et Vernet, 1998) a conclu à un comportement de type Binghamien, fluide plastique, dont la viscosité apparente est une fonction décroissante de la vitesse de cisaillement, c'est-à-dire que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin du cycle de malaxage.

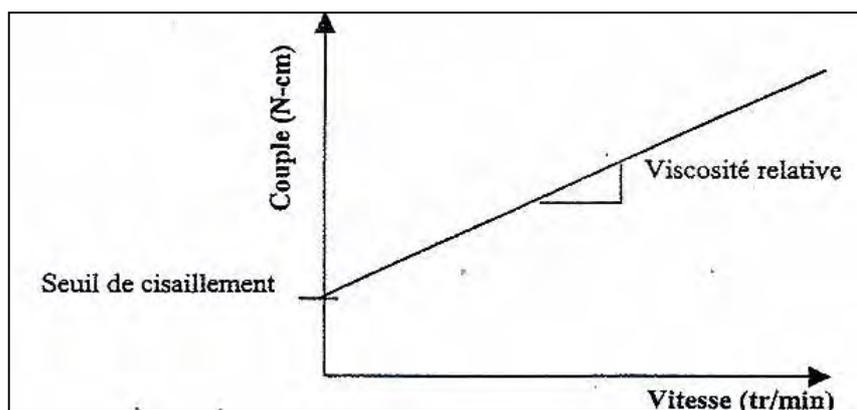


Figure 1 - 7 : Comportement rhéologique type des BFUP selon (Bonneau et Vernet, 1998)

La Figure 1 - 7 présente la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement dans le cas d'un BFUP de comportement Binghamien. Le seuil de cisaillement représente la contrainte de cisaillement minimale à appliquer pour induire un déplacement du fluide. La viscosité correspond à la pente de la relation linéaire entre le couple mesuré et la vitesse de rotation appliquée au béton lorsque l'écoulement du matériau est amorcé. (Bonneau, 1997) a montré que les BFUP étudiés présentent une viscosité élevée, ce qui implique l'entraînement d'air lorsque le matériau est en écoulement. Cet air entraîné peut être piégé au sein du matériau et difficile à expulser. Ceci conduit à une diminution des propriétés mécaniques liée à l'augmentation de cette teneur en air occlus. Ce chercheur a également montré que les BFUP étudiés ont un comportement thixotropique plus ou moins marqué selon les compositions, notamment en fonction du dosage en quartz broyé. La thixotropie des bétons étant corrélée au volume de pâte important et au faible rapport E/C, on comprend donc que les BFUP peuvent présenter un tel caractère. Plus la thixotropie est grande, et plus le risque de « coulage multicouches » est présent (Roussel, 2008). En effet, dans la pratique, le coulage d'une pièce de grand volume ne peut pas se faire en une seule fois. Il existe un délai de recouvrement entre les couches. Lorsque ce délai n'est pas respecté, le béton déjà mis en place se fige, et le béton de la gâchée suivante peut ne pas se mélanger correctement avec la première couche désormais plus ferme, provoquant une interface et une hétérogénéité de la structure finale, entraînant ainsi une chute des performances mécaniques (Roussel, 2008).

1.3.2. Propriétés mécaniques

Les BFUP possèdent des propriétés remarquables, aussi bien en termes de performances mécaniques que de durabilité. Ces propriétés sont obtenues grâce à une microstructure très compacte, due à une utilisation d'une grande quantité de liant, de sable fin, d'adjuvant et d'un

faible rapport E/C. Nous avons vu auparavant qu'un traitement thermique peut également être appliqué en complément pour accélérer les évolutions des performances mécaniques, ou les accroître par transformation des hydrates afin d'en former de plus résistants. Nous présentons dans cette partie une synthèse bibliographique sur leur comportement mécanique instantané et différé ainsi que les paramètres influents.

1.3.2.1. Comportement en compression

Une des propriétés exceptionnelles des BFUP est leur résistance caractéristique en compression à 28 jours, généralement supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa (AFGC, 2013). L'optimisation du squelette granulaire permet de diminuer le volume des vides et par conséquent d'augmenter la résistance en compression. Le traitement thermique permet de modifier la structure des hydrates pour les rendre encore plus performants. L'ajout de fibres peut améliorer la résistance en compression si le dosage volumique est supérieur à 2%. Tout d'abord, nous présentons, sur la Figure 1 - 8, le comportement en compression du Ductal® (Behloul, 1996).

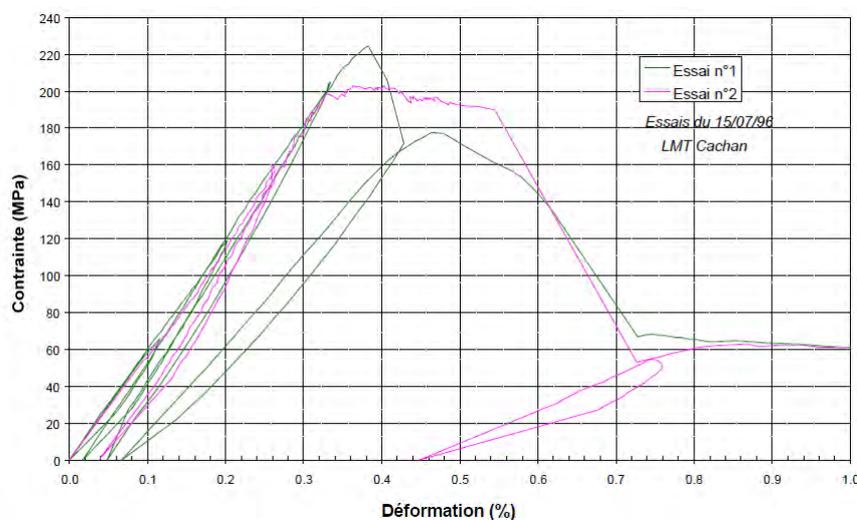


Figure 1 - 8: Relation « contrainte-déformation » en compression de Ductal® selon (Behloul, 1996)

Cette figure représente le comportement en compression typique du Ductal® obtenu à partir des essais en compression sur cylindres de 70 mm de diamètre, et de 140 mm de hauteur. La résistance en compression maximale a atteint une valeur maximale de 200 MPa, le module de Young est de 57 GPa, et la déformation maximale pour le palier plastique est de 0,375%. Le comportement post-pic adoucissant est obtenu grâce à l'incorporation de fibres. Celui-ci dépend directement de la quantité, du type de fibres et de leur interaction avec la matrice cimentaire.

Nous présentons ensuite dans le Tableau 1 - 8 une synthèse des valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours. Dans ce tableau, sont précisés les paramètres les plus influents relatifs à la formulation, le rapport E/C, le dosage en fibres, et les conditions d'ambiance, à savoir la cure et le traitement thermique. Il est important de noter que certaines valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours présentées sont inférieures à 150 MPa, la qualification de BFUP dans ces études ne faisant donc pas référence aux recommandations provisoires de (AFGC, 2002, 2013).

Tableau 1 - 8 : Synthèse des valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de la cure appliquée, de la teneur en fibres métalliques et du rapport E/C

Référence	Cure/TT	Teneur en fibres (%)	E/C	f_{cm28} (MPa)
(Richard et Cheyrezy, 1995)	20°C	-	-	170
	90°C			230
(Collepari et al., 1997)	20°C/95%HR	2,5	0,21-0,29	160-180
	90°C/95%HR			190-210
	160°C/95%HR			
(Kamen, 2007)	20°C/95%HR	9	0,14	255
	30°C			265
	40°C			268
(Chanvillard et Rigaud, 2003)	90°C/95%HR	2	-	160-240
(Jungwirth et Muttoni, 2004)	20°C/95%HR	2,5	-	199
(Boulay et al., 2004)	20°C/95%HR	11	-	200
(Markovic, 2006)	20°C/95%HR	1	0,2 (E/L)	120
		2		127
		4		132
(Farhat et al., 2007)	-	6	0,22	200
(Graybeal, 2007)	20°C/30%-50%HR	2	0,15	119
	90°C/95%HR			200
(Charron et al., 2008)	20°C/95%HR	6	0,16	168
(Tafraoui et al., 2009)	20°C/95%HR	2	0,27	98-192
	Etuve 90°C			133-204
	Etuve 150°C			141-234
(Yang et al., 2009)	20°C/95%HR	2	0,27	115-130
	90°C/95%HR			150-180
(Toledo Filho et al., 2012)	20°C/95%HR	2	0,16	162
(Francisco, 2012)	50°C/95%HR	2	0,2	122
(Corinaldesi et Moriconi, 2012)	20°C/95%HR	2,5	0,19-0,21	150-160
(Graybeal et al., 2012)	20°C/30%-50%HR	2	-	192
		2,5		213
	90°C/95%HR	2		220
		2,5		212
(Wille et al., 2012)	20°C/95%HR	0	0,22-0,18	194-246
		1,5	0,21	207
		2	0,19	227
		2,5	0,20-0,21	213-219
		3	0,19	261

Pour mieux analyser l'impact de chaque paramètre sur la résistance en compression, nous allons exploiter ces données issues de l'étude bibliographique pour étudier de manière indépendante et découplée l'influence du rapport E/C, de la teneur en fibres et des conditions de cure ou de traitement thermique.

1.3.2.1.1. Influence du rapport E/C

La réduction du rapport E/C est un des principes de formulation des BFUP pour atteindre des résistances mécaniques élevées. Généralement, ce rapport est autour de 0,2 pour les BFUP. La Figure 1 - 9 représente la relation entre la résistance moyenne en compression et le rapport E/C des BFUP. Les valeurs présentées sont obtenues pour les BFUP sans traitement thermique.

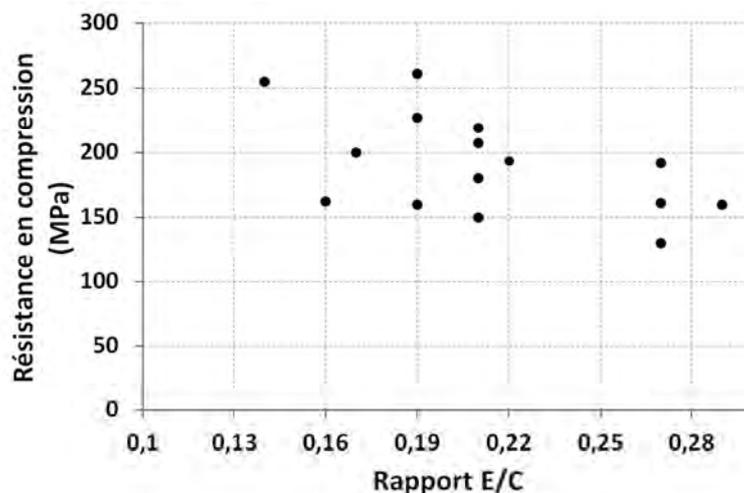


Figure 1 - 9 : Influence du rapport E/C sur la résistance moyenne en compression d'après les données bibliographiques du Tableau 1 - 8

Nous pouvons constater une tendance générale d'augmentation des résistances en compression lorsque le rapport E/C diminue. Cependant, à rapport E/C égal à 0,27, les valeurs de résistance varient de 130 MPa (Yang et al., 2009) à 192 MPa (Tafraoui et al., 2009), 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 (Wille et al., 2011).

1.3.2.1.2. Influence de la teneur en fibres

Globalement, la teneur en fibres influe peu sur la résistance en compression, sauf quand celle-ci dépasse un dosage volumique de 2% (Behloul, 1996). La Figure 1 - 10 présente les valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de différentes teneurs en fibres métalliques.

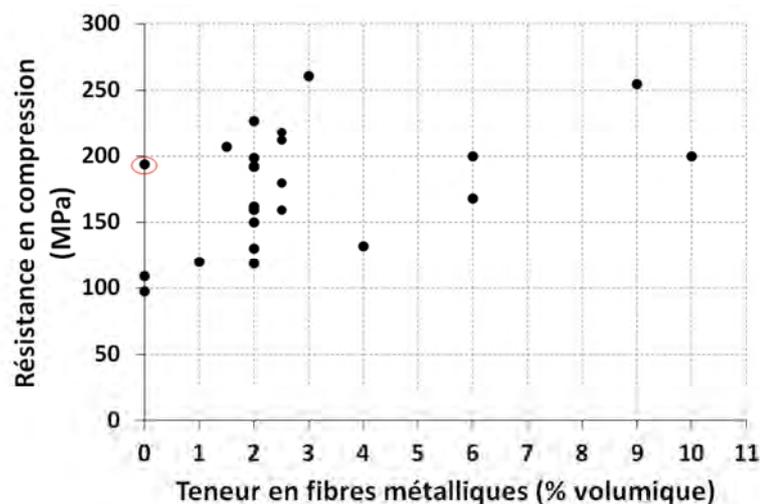


Figure 1 - 10 : Résistances en compression en fonction de la teneur en fibres métalliques d'après les données bibliographiques du Tableau 1 - 8

Sur cette figure, nous pouvons constater la tendance observée par (Behloul, 1996), qui a montré que l'incorporation des fibres dans les BUHP entraîne une augmentation de 5% à 10% de la résistance en compression lorsque le dosage en fibres atteint 4% volumique. (Markovic, 2006) a aussi montré une amélioration de 9% de la résistance en compression lorsque le taux d'incorporation de fibres passe de 1 à 4% volumique. Les fibres métalliques peuvent être incorporées dans la matrice cimentaire en quantité importante jusqu'à 10% volumique comme dans les BFUP de la gamme CEMTEC[®], sans provoquer une amélioration substantielle de la résistance en compression.

Sur la base de ces données, nous pouvons constater qu'une majorité d'études sont réalisées avec des dosages volumiques en fibres de 2 ou 2,5%, avec des résistances en compression variant entre 119 MPa et 261 MPa. Ces dosages sont considérés comme un bon compromis entre les performances mécaniques recherchées et le prix. Des récentes études (Wille et al., 2011) (Wille et al., 2012), (Wille et al., 2014) ont montré qu'il est possible d'obtenir une résistance en compression de 180 MPa sans ajout de fibres par amélioration de la compacité du mélange.

1.3.2.1.3. Impact d'un traitement thermique sur la résistance en compression

Nous avons présenté dans la partie 1.2.5.4 les différents types de cure à appliquer au BFUP : soit pour assurer les performances recherchées à 28 jours dans le cas d'une cure humide à 20°C ; soit pour accélérer les évolutions des résistances dans le cas d'un traitement thermique de type I ; soit pour accélérer les réactions d'hydratation mais surtout pour former

de nouveaux hydrates qui permettent d'accroître davantage la résistance mécanique dans le cas d'un traitement thermique de type II.

La tendance à l'augmentation de la résistance en compression des BFUP avec un traitement thermique de type II est généralement observée dans de nombreuses études (Richard et Cheyrezy, 1995), (Collepari et al., 1997), (Graybeal, 2007), (Yang et al., 2009), et (Tafraoui et al., 2009). Dans ces études, des augmentations de l'ordre de 12 à 40% ont été notées par rapport aux mêmes formulations sans traitement thermique. En revanche, (Collepari et al., 1997), ont obtenu des résistances en compression quasiment équivalentes entre la cure à 20°C et celle à 90°C des BPR modifiés où le quartz broyé n'était pas présent. Ceci montre que l'efficacité du traitement thermique varie en fonction de la composition du BFUP, en particulier l'utilisation ou non du quartz broyé qui modifie le rapport C/S et les hydrates formés.

Le traitement thermique à température modérée, entre 30°C et 50°C, ne modifie pas la microstructure, mais permet d'accélérer la prise. Ceci a été montré par (Kamen, 2007), et (Francisco, 2012), qui ont constaté une légère augmentation de la résistance en compression sur des éprouvettes ayant subi un traitement thermique de type I par comparaison avec celles obtenues sur des éprouvettes en cure humide à 20°C. Ce type de traitement thermique peut être un bon compromis pour garantir les résistances au jeune âge des pièces préfabriquées.

En ce qui concerne la cure à 20°C, la résistance en compression obtenue varie entre 113 MPa et 255 MPa. La recherche des résistances mécaniques élevées sans utilisation de traitement thermique pour limiter la consommation énergétique et le coût font l'objet de nombreuses études récentes (Toledo Filho et al., 2012), (Corinaldesi et Moriconi, 2012), et (Wille et al., 2012) qui se concentrent sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire du mélange. Des valeurs de résistance en compression de plus de 200 MPa ont été atteintes dans l'étude de (Wille et al., 2012), grâce à l'optimisation de la compacité du mélange.

1.3.2.2. Comportement en traction

Une caractéristique remarquable des BFUP est leur résistance en traction dont la valeur minimale de 6 MPa d'après la prénorme (PR NF P18-470) est largement supérieure à celle des bétons ordinaires qui est de l'ordre de 3 MPa. Cette propriété est acquise grâce à l'optimisation de la compacité de la matrice et à l'ajout de fibres. L'incorporation de fibres

dans la matrice cimentaire permet également d'améliorer fortement le comportement post-fissuration. Les fibres utilisées sont le plus souvent métalliques. Le dosage et les dimensions de fibres sont optimisés vis-à-vis du comportement en traction recherché et des conditions de mise en œuvre, avec ou sans vibration. Il est également possible de combiner des fibres de dimensions variables tel que dans le CEMTEC_{multiscale}[®] afin d'améliorer la résistance à la traction et la ductilité. En effet, les microfibrilles (fibres courtes) retardent le développement des microfissures tandis que les macrofibres (fibres longues) peuvent conférer au matériau une grande ductilité (Rossi et al., 1987).

Nous présentons sur la Figure 1 - 11 la loi de comportement typique en traction d'un béton ordinaire renforcé de fibres et celle d'un BFUP obtenues lors d'essais de traction directe pilotés en déplacement (Naaman, 2007).

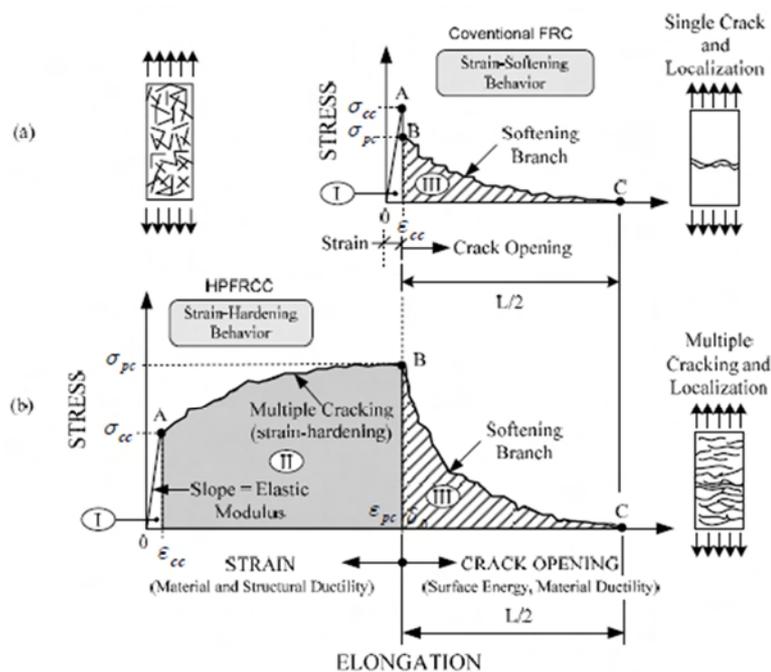


Figure 1 - 11 : Comportement en traction des bétons renforcés de fibres (Naaman, 2007)

Dans le cas d'un béton renforcé de fibres traditionnel (BRF), la matrice cimentaire n'est pas aussi compacte que celle des BFUP, et la teneur en fibres incorporée est généralement plus faible (inférieure à 1%). Par conséquent, leur loi de comportement se caractérise par une résistance élastique, notée σ_{cc} , et une résistance post-fissuration, notée σ_{pc} , inférieures à celles des BFUP. La résistance élastique σ_{cc} correspond à la contrainte à la fin de la phase élastique linéaire correspondant au point A de la Figure 1 - 11. La résistance post-fissuration correspondant au point B sur cette figure est égale à la valeur maximale de la phase

écrouissante dans le cas des BFUP. En l'absence de phase écrouissante dans le cas des BRF, c'est la valeur correspondant à une déformation limite, notée ε_{cc} . Dans les deux cas, le comportement en traction décrit par (Naaman, 2007) peut être décomposé en 3 domaines :

- Domaine élastique linéaire (I) jusqu'à 90% de la contrainte de fissuration : cette phase est définie par une résistance et une déformation élastique. La résistance obtenue à la fin de la phase élastique correspond à la résistance élastique en traction.
- Domaine écrouissant (II) : cette phase existe uniquement dans le cas des BFUP, et correspond à la propagation des microfissures avec de faibles ouvertures. La déformation obtenue dans cette phase est non élastique (non réversible). Sous l'action des fibres, la résistance continue à augmenter jusqu'à une valeur maximale qui correspond à la résistance en traction.
- Domaine adoucissant (III) : cette phase correspond à la localisation d'une macro-fissure créée après coalescence de microfissures, et accompagnée d'une diminution de la résistance en traction.

Dans ce cas des bétons fibrés adoucissants, la phase élastique linéaire est suivie par un domaine adoucissant (softening branch) comme indiqué sur la Figure 1 - 11a. En revanche, dans le cas des bétons écrouissants, la phase élastique linéaire est donc suivie par un domaine écrouissant (strain hardening). La loi de comportement en traction post-fissuration est décrit par la relation « contrainte-déformation ». Il est caractérisé par la propagation des microfissures avec une faible ouverture, par une déformation non élastique et par une augmentation de la résistance jusqu'à une valeur maximale qui correspond à la résistance en traction post-fissuration. Cette différence entre les deux types de comportement adoucissant d'un BRF ou écrouissant du BFUP provient du dosage et de la nature des fibres, de la qualité de l'interface entre les fibres et la matrice, et de l'orientation des fibres vis-à-vis de la direction de la traction.

Nous présentons dans le Tableau 1 - 9 une synthèse des caractéristiques représentant le comportement en traction des BFUP, à savoir la résistance élastique et la résistance post-fissuration. Dans ce tableau, sont précisés les paramètres les plus influents relatifs à la formulation, à savoir la teneur en fibres et leur élanement. Les valeurs des caractéristiques présentées sont soit déterminées par des essais de traction directe, soit par des essais de flexion dont les résultats sont exploités par une méthode d'analyse inverse spécifique permettant de retrouver la loi de comportement en traction. Dans les deux cas, les essais

réalisés sont pilotés en déplacement. Pour simplifier l'analyse, les notations suivantes ont été adoptées :

- V_f représente le dosage volumique en fibres, exprimé en %,
- L_f est la longueur des fibres, exprimée en mm,
- d_f est le diamètre de fibres, exprimée en mm,
- $f_{ct,el}$ est la résistance élastique en traction, exprimée en MPa,
- $f_{ctf,max}$ est la résistance maximale en traction post-fissuration, exprimée en MPa.

Tableau 1 - 9 : Synthèse des caractéristiques relatives au comportement en traction en fonction de du dosage volumique en fibres (V_f) et de leur élancement (L_f/d_f)

Référence	V_f (%)	L_f/d_f	$f_{ct,el}$ (MPa)	$f_{ctf,max}$ (MPa)
(Rossi, 1997)	7	20	12	16
		60		
(AFGC, 2002)	2	65	-	9
	2,5	65	-	9
(Jungwirth et Muttoni, 2004)	2,5	65	8,9	9,9
(Wuest, 2007)	6	50	9	9,65
	4	81,3	10,5	12,6
	10	33,3	8,7	-
60				
(Sato, 2000)	4	37,5	-	11
	5,5	37,5	-	20
		60		
(Tailhan et al., 2012)	11	$L_f=2mm$	-	20
		33,3		
		80		
(Markovic, 2006)	1	85,7	-	7,5
	1,5	65	-	11,75
		85,7		
	2	65	-	12,5
	3	65	-	15,3
	2	65	-	12
80				
(Spasojevic, 2008)	2		8,9	9,7
(Baby, 2012) (Graybeal et al., 2012)	2	65	9,09	11,2
	2,5	65	9,07	11,56
	2,5	66,7	6,18	10,53
(Hassan et al., 2012)	2	65	8,5	9,07
(Wille et al., 2012)	0	-	6,1-9,0	-
(Wille et al., 2014)	2	S_65	11,8	15
	2,5		12	16,5
	3		12,5	17,8
	1,5	H_79	7,3	12,4
	2		9,4	14,7
	3		11	19,3
	1,5	T_60	8,7	11,1
	2		10,9	14,2
	3		13,3	19,6
S : fibres droites				
H : fibres accrochées aux extrémités				
T : fibres ondulées				

Nous allons exploiter ces données expérimentales afin d'analyser l'effet du dosage en fibres et de leur élancement sur les caractéristiques en traction présentées.

1.3.2.2.1. Effet de la teneur en fibres (V_f)

La Figure 1 - 12 présente la résistance en traction post-fissuration des BFUP en fonction de la teneur en fibres métalliques (les valeurs présentées correspondent à des valeurs moyennes).

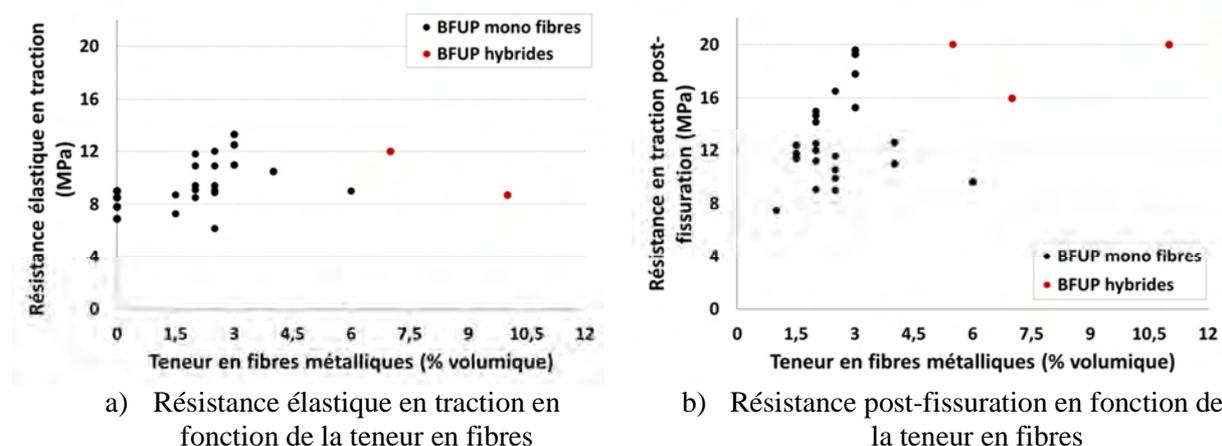


Figure 1 - 12 : Influence de la teneur en fibres sur la résistance élastique et résistance post-fissuration en traction

Globalement, nous pouvons observer sur la Figure 1 - 12a une légère amélioration de la résistance élastique avec l'incorporation de fibres en comparant avec les BUHP (sans fibres). L'impact de la teneur en fibres sur la résistance élastique n'est pas notable au-delà de 3% volumique. Les valeurs varient de 6,2 MPa à 13,3 MPa et sont élevées grâce à l'obtention de matrices très compactes.

En revanche, le dosage en fibres semble avoir davantage d'influence sur la résistance post-fissuration, notamment entre 1 et 3% avec une résistance qui augmente avec le dosage. Au-delà, l'effet semble plus diffus. Il est important de préciser qu'il y a deux catégories de BFUP dont les résultats sont présentés : certains incorporent un seul type de fibres et d'autres jusqu'à 3 types de fibres de longueurs différentes.

Pour les BFUP mono fibres (AFGC, 2013), (Baby, 2012), (Graybeal et al., 2012), (Wille et al., 2014) avec un dosage en fibres de 1 à 6% volumique, les valeurs de résistance maximale post-fissuration varient de 7,5 à 20 MPa. Nous rappelons que le dosage en fibres classique de 2 à 2,5% volumique permet d'obtenir un bon compromis entre les performances en traction recherchées et le prix (AFGC, 2013). Cependant, une récente étude de (Wille et al., 2014) a montré que l'ajout de 1,5% volumique de fibres métalliques à hautes résistances

avec accrochage aux extrémités à hautes résistances combiné à une matrice cimentaire très compacte permet d'obtenir une résistance en traction post-fissuration de 12,4 MPa.

Pour les BFUP hybrides (Rossi, 1997), (Wuest, 2007), (Sato, 2000), (Markovic, 2006), (Tailhan et al., 2012) combinant plusieurs types de fibres de dimensions différentes (différents élancements L_f/d_f), les efforts de traction sont repris aux niveaux micro et macro fissuration respectivement par les microfibrilles ($L_f/d_f = 6/0,16$ typiquement) et les macrofibres ($L_f/d_f = 60/0,7$). En général, ces bétons incorporent un dosage volumique élevé en fibres, allant au-delà de 6%. Des résistances en traction post-fissuration de 16 à 20 MPa peuvent être atteintes. Toutefois, l'élancement des fibres joue un rôle important vis-à-vis de la maniabilité et de l'ancrage des fibres. Un accroissement du pourcentage de fibres et/ou de l'élancement (L_f/d_f) conduit à une réduction de l'ouvrabilité du mélange. Une bonne ouvrabilité peut être obtenue par des fibres courtes et de faibles diamètres, alors qu'un meilleur ancrage peut être obtenu avec des fibres longues pour permettre le transfert des forces à travers les macrofissures (Tailhan et al., 2012).

1.3.2.2.2. Influence de l'orientation de fibres

Les recherches récentes ont montré que la distribution et l'orientation de fibres métalliques ont des effets considérables sur le comportement structurel à la traction (Behloul, 1996), (Wuest, 2007), (Oesterlee, 2010), (Delsol, 2012). Ces auteurs ont montré que l'angle d'inclinaison des fibres influence fortement le comportement en traction. Parmi ces études, nous citons celles de (Oesterlee, 2010) et de (Delsol, 2012) comme exemple de résultats obtenus (Figure 1 - 13).

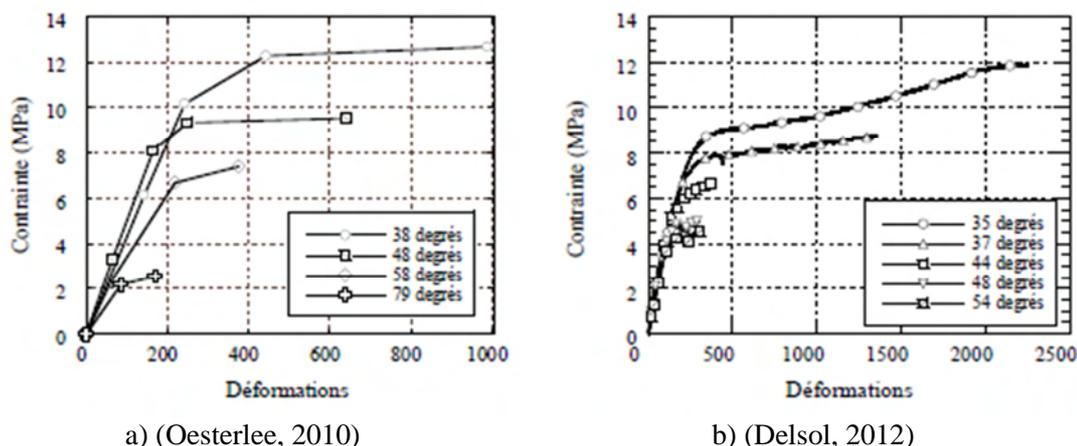


Figure 1 - 13 : Comportement en traction directe pour différentes orientations de fibres : (a) : selon (Oesterlee, 2010); (b) : selon (Delsol, 2012)

Les résultats montrent que l'angle d'inclinaison des fibres dans la matrice cimentaire joue un rôle important sur le comportement post-fissuration (phase écrouissante de la courbe contrainte-déformation). L'angle d'inclinaison dans ces études correspond à l'angle formé entre la fibre et l'effort de traction (l'angle d'inclinaison à 0° signifie que la fibre est orientée parallèlement à l'effort de traction). Plus l'angle d'inclinaison est faible (35°-38°), plus la résistance en traction et la longueur de la phase écrouissante augmentent.

1.3.2.3. Déformations différées des BFUP

Cette partie présente les spécifications concernant les déformations différées des BFUP en distinguant les phénomènes de retrait et de fluage. Nous traitons tout d'abord les déformations de retrait et leurs mécanismes de manière générale, puis nous présenterons des résultats de retrait de BFUP. Nous appliquerons la même démarche pour le cas du fluage.

1.3.2.3.1. Déformations de retrait

Les déformations de retrait correspondent à une diminution de volume d'un élément en béton en l'absence de sollicitation mécanique. Nous considérons deux types de retrait, le retrait endogène lorsque les échanges hydriques avec le milieu environnant sont empêchés et le retrait total ou retrait en dessiccation lorsqu'ils sont permis. La part de contraction due au séchage est appelée retrait de dessiccation et correspond à la différence entre les mesures de retrait total et celles de retrait endogène.

Le retrait endogène regroupe le retrait plastique, le retrait chimique (ou contraction de Le Chatelier), le retrait thermique, et celui d'autodessiccation à l'état durci, en l'absence d'échange hydrique avec le milieu extérieur. Nous traitons ici uniquement les phénomènes à

l'origine du retrait endogène d'autodessiccation à l'état durci. Ce sont les pressions capillaires et celles de disjonction qui pilotent le retrait endogène. Au cours de l'hydratation, l'eau capillaire va être consommée pour former les hydrates qui combleront la porosité et vont participer à la densification et à la structuration de la matrice cimentaire. Cette diminution de la teneur en eau par autodessiccation provoque ainsi une réduction de l'humidité interne et l'apparition de tensions à l'intérieur des pores capillaires. Ces tensions internes sont régies par la loi de Kelvin Laplace, dont l'intensité est inversement proportionnelle au diamètre des pores capillaires. Elles sont donc élevées lorsque le rayon des pores est faible, conformément à cette loi, ce qui entraîne une contraction isotrope du volume global du matériau.

Le retrait de dessiccation est lié, quant à lui, à la différence d'hygrométrie entre le béton et le milieu ambiant. Lorsque le béton est conservé dans une ambiance d'humidité inférieure à celle du matériau, celui-ci tend à sécher pour tendre vers l'état d'équilibre hydrique. La dessiccation des pores provoque ainsi des tensions capillaires et donc un retrait dit de dessiccation. Les gradients hydriques sont plus importants au niveau des surfaces d'échange et sont plus réduits au cœur de l'élément du fait de la diffusion lente de l'eau, qui est fonction de la porosité du matériau. Cela induit des états de contraintes différents dans l'épaisseur de l'éprouvette, comme l'illustre la Figure 1 - 14a, avec les distributions qualitatives de contraintes normales. Ces contraintes de traction en surface peuvent conduire à une fissuration en peau et donc à une relaxation partielle des contraintes comme le montre la Figure 1 - 14b (Granger, 1995). Ce phénomène est d'autant plus accentué que le béton est soumis à une ambiance sèche.

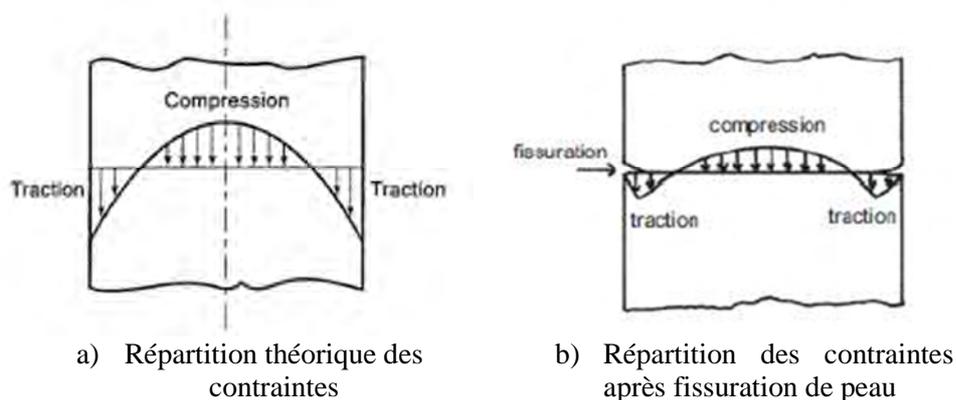


Figure 1 - 14 : Profil des contraintes d'une éprouvette soumise au retrait de dessiccation (Pons, 1998)

1.3.2.3.1.1. Retrait endogène des BFUP

Il est important de distinguer les BFUP avec et sans traitement thermique. Le retrait endogène des BFUP sans traitement thermique est élevé par rapport aux bétons classiques.

Ceci est dû à l'affinement du réseau poreux par réduction du rapport E/C à des valeurs inférieures ou égales à 0,2, et par l'utilisation d'une grande quantité de liant. Pour les BFUP avec traitement thermique, il peut être fortement réduit, voire être inexistant selon le type de traitement thermique. Le retrait endogène des BFUP avec traitement thermique de type II est quasiment nul (cette spécification sera traitée ultérieurement). Le Tableau 1 - 10 synthétise les résultats obtenus sur les différents BFUP. Les valeurs présentées sont obtenues sur les BFUP sans traitement thermique et avec traitement thermique de type I.

Tableau 1 - 10 : Retrait endogène de différents BFUP sans traitement thermique et avec TT de type I

Produits	Traitement thermique	Retrait endogène ($\mu\text{m/m}$)	Echéance (jours)	Référence
BPR	Non	440	90	(Cheyrezy et Behloul, 2001)
Ductal [®]	Non	500	365	(Loukili, 1996), (Loukili et al., 1999)
CEMTEC [®]	Non	542	365	(Kamen, 2007)
BFUP A	Oui, à 50°C	280	350	(Francisco, 2012)

Le BFUP sans traitement thermique de type Ductal[®], issu du BPR, développe un retrait endogène 500 $\mu\text{m/m}$ à 365 jours. (Kamen, 2007) a mesuré un retrait endogène d'un BFUP de type CEMTEC[®] de 542 $\mu\text{m/m}$ à 365 jours, dont plus de 200 $\mu\text{m/m}$ ont été atteint durant les 7 premiers jours. Cette cinétique élevée au jeune âge est due à la consommation rapide de l'eau disponible durant la phase d'hydratation, ce qui entraîne une forte diminution de l'humidité relative interne par autodessiccation, à l'origine d'intenses tensions capillaires. La valeur du retrait endogène d'un BFUP sans traitement thermique considérée par (AFGC, 2013) est de 550 $\mu\text{m/m}$. Pour un BFUP soumis à un traitement thermique de type I à 50°C, le retrait endogène mesuré par (Francisco, 2012) est de 280 $\mu\text{m/m}$ environ à 350 jours, sachant que les mesures sont relevées après le cycle de traitement thermique. Selon l'auteur, une part de retrait endogène a lieu pendant le traitement thermique avant le début des relevés de mesures, d'où les valeurs inférieures.

Généralement les mesures de retrait sont démarrées lors du démoulage un jour après la date de coulage. Cependant, certaines études s'intéressent à la part de retrait antérieur à cette échéance (retraits chimique, plastique et thermique) qui est non négligeable. (Habel, 2004) a ainsi mesuré le retrait endogène d'un BFUP dès deux heures après le premier contact eau-ciment. Il a mesuré un retrait endogène après 7 jours de l'ordre de 300 $\mu\text{m/m}$. Lorsqu'il a débuté les mesures à partir de 54 heures, il a obtenu à la même échéance de 7 jours une valeur de 200 $\mu\text{m/m}$. La part de retrait entre 2 et 54 heures représente un accroissement de 50 % du

retrait à 7 jours. Cette évolution rapide est liée à l'autodessiccation importante durant les premières heures de l'hydratation. Une stabilisation du retrait endogène a été observée à partir de trois mois.

1.3.2.3.1.2. Retrait de dessiccation des BFUP

Le retrait dû au séchage, ou retrait de dessiccation, correspond à la différence entre le retrait total mesuré lorsque les échanges hydriques sont possibles, et le retrait endogène. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation des BFUP est faible par rapport à celui des bétons de moindre classe de résistance. Ceci s'explique par le fait que les BFUP ont un rapport E/C réduit autour de 0,20 voire inférieur, et par conséquent la quantité d'eau libre susceptible de migrer vers l'environnement extérieur est faible par rapport celle des bétons ordinaires. Et ce, d'autant plus que ses matériaux, grâce à de telles valeurs de rapports E/C, ont une très forte compacité et une porosité très limitée qui restreint la diffusion de l'eau vers les zones de séchage en surface.

Tableau 1 - 11 : Retrait de dessiccation de différents BFUP

Echéance (jours)	Retrait de dessiccation ($\mu\text{m/m}$)	Traitement thermique	Référence
80	150	Type II	(Loukili, 1996)
90	80	non	(Habel, 2004)
365	160-180	Type II	(Cheyrezy et Behloul, 2001)
60	100	non	(Kamen, 2007)
350	130	Type I	(Francisco, 2012)

Le Tableau 1 - 11 regroupe les amplitudes de retrait de dessiccation de plusieurs BFUP en fonction des échéances de mesures. La valeur finale considérée par (AFGC, 2013) est de 150 $\mu\text{m/m}$. La cinétique d'évolution du retrait de dessiccation est rapide pendant les 7 premiers jours lorsque de l'eau libre, qui n'a pas encore réagi, est encore disponible. Au-delà, la densification de la matrice cimentaire et la très faible quantité d'eau libre limitent les échanges hydriques avec le milieu extérieur et atténuent significativement la cinétique et l'amplitude de retrait de dessiccation.

1.3.2.3.1.3. Paramètres influençant les déformations de retrait

2. Influence du rapport E/C

Le paramètre qui influence le plus le retrait endogène des bétons est le rapport E/C. De nombreuses études (Loukili, 1996), et (Habel, 2004) ont montré que le retrait endogène est élevé pour les bétons de faible rapport E/C tels que les BFUP. La compacité qui en résulte,

améliorée par effet filler et par les réactions pouzzolaniques des additions ultrafines telles que la fumée de silice ou le métakaolin, conduit à une porosité très fine et très segmentée qui génère des tensions capillaires et des déformations de retrait endogène supérieures à celles des bétons ordinaires. Par ailleurs, (Loukili, 1996) a constaté expérimentalement que le retrait endogène des BPR non traités thermiquement devient faible lorsque le rapport E/L est réduit à des valeurs inférieures à 0,15. Pour de telles valeurs, le degré d'hydratation reste faible et, d'après (Francisco, 2012), les mécanismes physiques engendrés par l'action de l'eau semblent ne pas avoir de conséquences sur les déformations différées.

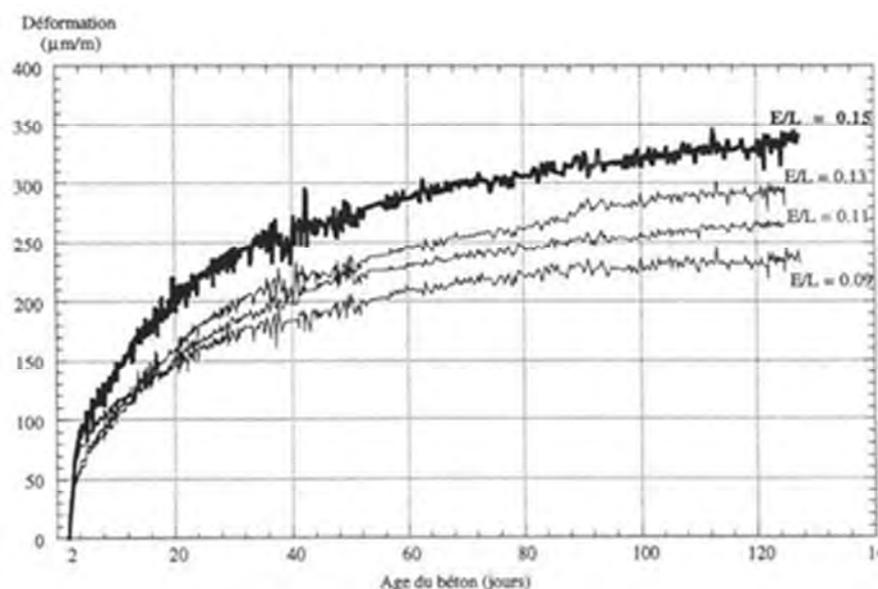


Figure 1 - 15 : Influence du rapport E/L sur le retrait du BPR selon (Loukili, 1996).

➤ Influence de la nature de ciment

La composition minéralogique et la finesse de ciment peuvent avoir des effets sur le retrait endogène des bétons ordinaires ainsi que des BFUP, en particulier la présence de C_3A (Tazawa et Miyazawa, 1995), (Tazawa et Miyazawa, 1997) et (Loukili, 1996). En effet, la formation de l'ettringite consécutive à la réaction entre les sulfates régulateurs de prise et le C_3A consomme une quantité importante d'eau et par conséquent engendre des variations volumiques non négligeables. La finesse du ciment influe également sur le retrait endogène. Plus la finesse est élevée, plus la surface totale en contact avec l'eau est grande, et plus le retrait endogène est important (Tazawa et Miyazawa, 1995).

➤ Influence des additions minérales

Les additions minérales sont souvent utilisées dans les BFUP en substitution partielle du ciment. Elles permettent d'augmenter la compacité et forment des produits d'hydratation par effet pouzzolanique. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'influence de la fumée de silice et du métakaolin sur les déformations de retrait. Les études ont surtout été réalisées pour les bétons classiques et très peu pour les BFUP.

Les études de (Jensen et Hansen, 2001) et de (Tazawa et Miyazawa, 1995) ont montré que l'ajout de fumée de silice conduit à un retrait endogène important par rapport aux bétons sans fumée de silice. Ils l'expliquent par sa grande surface spécifique qui conduit à un affinement de la structure poreuse et engendre des tensions capillaires plus intenses. En revanche, pour les taux d'incorporation inférieurs à 15% en masse de ciment, (Brooks et al., 1999) n'ont pas noté d'effets majeurs sur le retrait endogène.

Toujours pour les bétons ordinaires, les travaux de (Brooks et Johari, 2001) ont montré que l'incorporation du métakaolin en substitution du ciment (de 5 à 15%) contribue à diminuer le retrait endogène au jeune âge (Figure 1 - 16a), mais pas à long terme (Figure 1 - 16b).

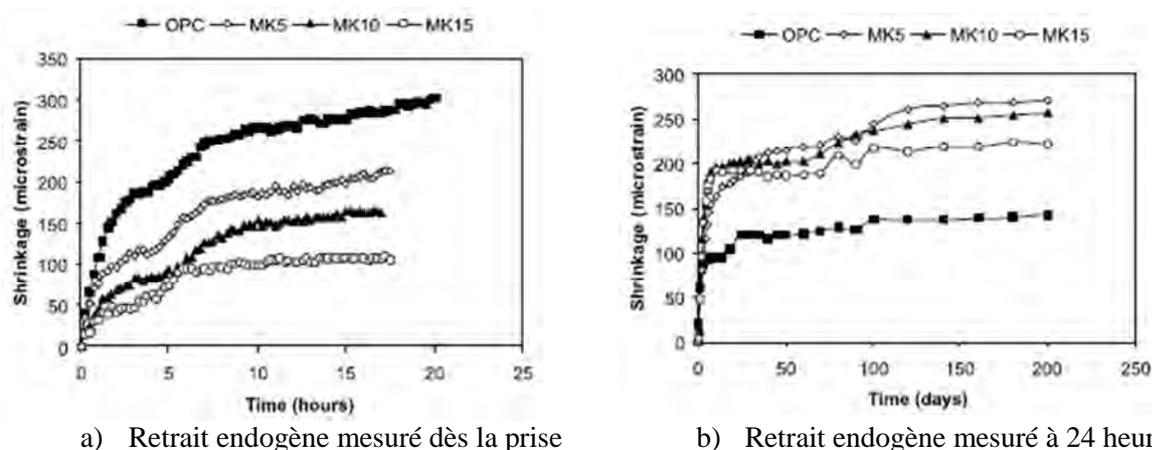


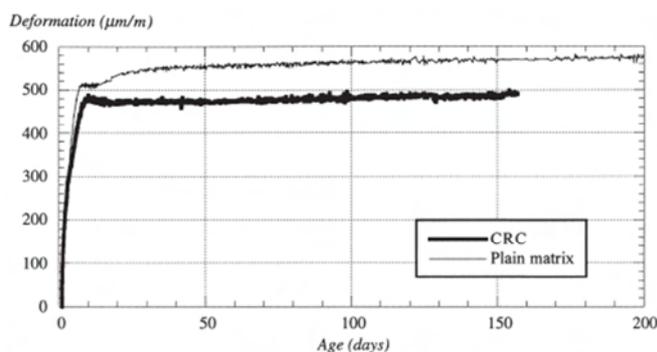
Figure 1 - 16: Influence de la teneur en métakaolin sur le retrait endogène mesuré selon (Brooks et Johari, 2001)

La Figure 1 - 16 illustre l'évolution du retrait endogène à jeune âge et à long terme de différents bétons dont l'incorporation du métakaolin varie de 0 à 15% en masse du ciment (Brooks et Johari, 2001). Pour les mesures qui ont commencé à partir de la prise du béton jusqu'à 24 heures, les résultats montrent que l'incorporation de métakaolin permet de réduire de 65% le retrait endogène. Ceci s'explique par le fait que les bétons contenant du métakaolin ont une teneur moindre en ciment, par conséquent les réactions d'hydratation à jeune âge peuvent être retardées par rapport à celui sans métakaolin. Pour les mesures qui ont été

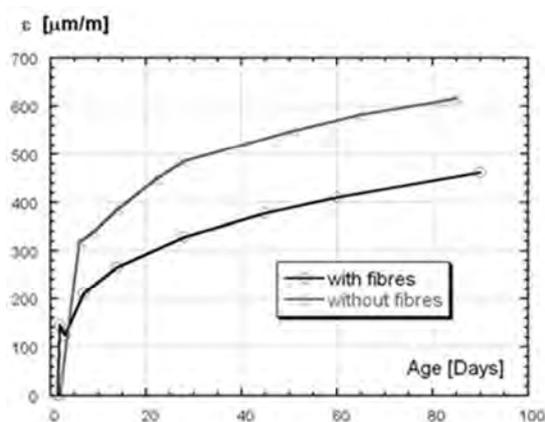
débutées à 24 heures et ont été suivies jusqu'à 200 jours, les valeurs finales montrent que la substitution de 5% de métakaolin induit une augmentation du retrait endogène de 66% environ en comparaison avec le béton sans métakaolin. En revanche, le retrait endogène à la même échéance semble diminuer lorsque le taux d'incorporation augmente (de 10 à 15% en masse de ciment). Les hypothèses de (Wild et al., 1998) ont été avancées pour expliquer ces résultats. En effet, les auteurs ont expliqué que pour des taux d'incorporation élevés de métakaolin (supérieur à 15% en masse de ciment), les hydrates de type stratlingite sont formés à la place des aluminates tétracalciques hydratés, ce qui engendre une augmentation du volume total des hydrates, réduisant ainsi le retrait endogène. Une étude plus récente de (Tafraoui, 2009) a montré que le retrait endogène de BFUP avec fumée de silice est plus élevé, 930 $\mu\text{m/m}$ à 370 jours, que celui avec métakaolin, 820 $\mu\text{m/m}$ à 400 jours (début des mesures à 24 heures).

➤ Influence de la teneur en fibres

L'action des fibres sur le retrait endogène a également été mise en évidence. Comme l'illustre la Figure 1 - 17, (Loukili et al., 1999) ont montré que le retrait endogène d'un BFUP diminue de 10% avec un dosage volumique de 6% de fibres métalliques de 12 mm de longueur et de 0,4 mm de diamètre. (Kamen, 2007) a constaté une réduction de 35 % du retrait endogène d'un BFUP appartenant à la famille CEMTEC[®] avec l'incorporation de 9% volumique de différents types de fibres. (Kanellopoulos, 2004) a aussi étudié le retrait endogène des bétons à hautes performances avec fibres et a obtenu après 75 jours une valeur de 1000 $\mu\text{m/m}$ pour la matrice sans fibres, et une valeur de 577 $\mu\text{m/m}$ pour le mélange avec fibres sans mentionner le dosage de fibres utilisé.



a)



a)

Figure 1 - 17 : Influence de la présence de fibres sur le retrait endogène de BFUP sans traitement thermique : a) selon (Loukili et al., 1999) ; b) selon (Kamen, 2007)

Dans une étude plus récente de (Garas et al., 2009) réalisée sur les BFUP de la gamme Ductal® avec et sans fibres, des fibres droites de 13 mm de longueur et de 0,2 mm de diamètres ont été utilisées à une teneur de 2% volumique. L'incorporation de fibres permet de réduire jusqu'à 50% le retrait total.

➤ Influence du traitement thermique

Comme nous l'avons déjà évoqué auparavant, en présentant des résultats de retrait de BFUP, le traitement thermique a un effet significatif sur ce type de déformation. Le retrait endogène d'un BFUP après un traitement thermique est réduit et l'intensité de cette réduction dépend du type de traitement thermique. Il s'avère que le retrait endogène des BFUP mesuré après le traitement thermique de type II à 90°C et 100%HR est quasiment inexistant (Loukili, 1996) comme l'illustre la Figure 1 - 18. Dans ces conditions, les réactions d'hydratation sont accélérées, ainsi que la consommation d'eau. C'est donc l'autodessiccation qui est accéléré pendant le traitement thermique. A titre d'exemple, le retrait total de Ductal® après un traitement thermique à 90°C est nul et le matériau a atteint sa maturité.

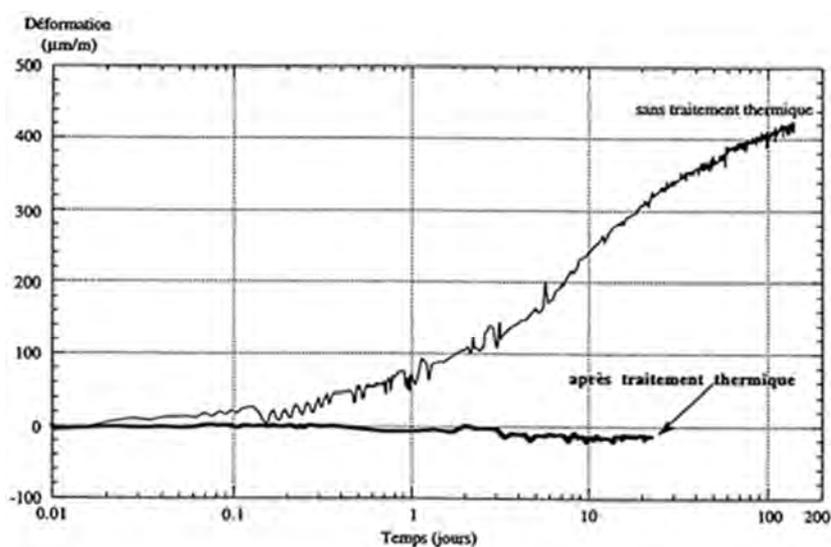


Figure 1 - 18: Influence du traitement thermique sur le retrait endogène de BPR (Loukili, 1996)

(Francisco, 2012) a lui réalisé des mesures de retrait après le traitement thermique de type I et a relevé une valeur de 280 µm/m pour le retrait endogène à 350 jours. Nous rappelons ici que le TT de type I permet d'accélérer l'hydratation du béton au jeune âge, ce qui induit qu'une part de déformations de retrait a eu lieu pendant le traitement thermique.

➤ Influence de l'adjuvant

Le type et le dosage d'adjuvant utilisé peut avoir des effets sur le retrait endogène s'il contient des alcalins. Ces effets sont négligeables dans le cas des bétons ordinaires (Tazawa et Miyazawa, 1995) car les adjuvants influent peu sur le taux d'hydratation. Pour les BFUP, il n'y a pas encore d'études qui se sont intéressées à cet effet malgré l'utilisation d'une grande quantité de superplastifiant.

1.3.2.3.2. Généralités sur les déformations de fluage

Cette partie présente les généralités sur les déformations de fluage en compression et en traction. Ces déformations sont prises en compte dès la phase de conception des structures en bétons. Il est généralement considéré que le fluage en traction est similaire au fluage en compression. Compte tenu des difficultés de mise en œuvre de ce type d'essai de fluage en traction, en particulier au jeune âge, ceci explique que la plupart des études ne portent que sur le fluage en compression.

De manière générale, le fluage est la variation dimensionnelle différée en présence d'un chargement mécanique maintenu constant dans le temps. On distingue deux fluages : le fluage propre et le fluage de dessiccation. Le fluage propre est défini comme les déformations mesurées sur les éprouvettes de béton chargées en condition endogène, c'est-à-dire sans échange d'humidité avec le milieu extérieur, auxquelles on soustrait les déformations liées au retrait et la déformation instantanée liée au chargement. Le fluage de dessiccation correspond à la part de déformation complémentaire qui se développe lorsque le béton est soumis à un chargement mécanique et que, simultanément les échanges hydriques avec le milieu extérieur sont permis. De manière conventionnelle et similaire au retrait, on considère que le fluage total, qui est mesuré, est la somme de la part de fluage propre et de la part lié au séchage, à savoir donc le fluage de dessiccation.

Il existe deux façons de décrire le fluage. Le fluage spécifique correspond à la déformation de fluage par unité de contrainte appliquée et est exprimé en ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$). Le fluage spécifique permet ainsi, en normant la déformation par rapport à la contrainte appliquée, de comparer le potentiel viscoélastique de différents matériaux chargés à des niveaux de contrainte différents. Le fluage peut également être exprimé par le biais du paramètre de coefficient de fluage, qui est défini comme le rapport entre la déformation de fluage et la déformation élastique du matériau. C'est donc une grandeur adimensionnelle.

➤ Fluage en compression

Selon (Neville, 1981) et (Baron, 1982), les mécanismes de fluages en compression sont liés aux mouvements internes de l'eau adsorbée, d'écoulement visqueux, de glissement entre les particules de gel, et de microfissuration.

Les mécanismes de fluage propre sous chargement constant sont régis par l'eau et peuvent être décomposés en deux types de déformation qui interviennent à court et long terme. A court terme, la cinétique de déformation de fluage propre est élevée pendant les jours qui suivent l'application du chargement, et puis diminue avec le temps. Le fluage propre à court terme peut être expliqué par plusieurs phénomènes, mais le plus probable est la migration de l'eau adsorbée dans la porosité capillaire sous contraintes (Ulm et Coussy, 1998). La diffusion de l'eau libre dans l'espace capillaire débute lors de l'application d'un chargement extérieur. Les contraintes sont retransmises dans les pores intrahydrates au travers des produits d'hydratation qui entourent les pores capillaires. Ce transfert induit localement un déséquilibre thermodynamique entre les molécules d'eau dans ces zones de transmission et celles qui sont dans les pores capillaires. Afin de revenir à l'équilibre, les molécules d'eau diffusent dans les couches d'eau adsorbée vers la porosité capillaire entraînant la déformation du squelette solide. On peut d'ailleurs noter que la cinétique de la déformation de fluage à court terme est influencée par le rapport E/C (Ulm et Coussy, 1998), ce qui conforte cette hypothèse puisque ce rapport influence la distribution des pores capillaires. Le fluage propre à long terme serait lié aux phénomènes physiques agissant au niveau des feuillettes de C-S-H tels que la relaxation des contraintes localisées par dislocation des liaisons physiques existant entre les feuillettes C-S-H par glissements par exemple (Bažant et al., 1997), (Ulm et Acker, 1998). (Acker et Ulm, 2001) ont montré par des expériences de nano-indentation sur des Bétons à Très Hautes Performances que seuls les C-S-H pouvaient être le siège des déformations visqueuses.

En ce qui concerne le fluage de dessiccation sous charge constante d'un béton soumis simultanément à des échanges hydriques, de séchage dans la plupart des cas, on considère deux types de mécanismes, l'un dit structural et le second dit intrinsèque. Pour expliquer le fluage de dessiccation structural, il faut considérer une éprouvette qui sèche librement sans contrainte mécanique. Des mécanismes dues aux différences de gradients hydriques entre la surface et le cœur du matériau génèrent des contraintes de traction en surface conduisant à une microfissuration de la peau du béton (Pons, 1998). Si une contrainte de compression est

appliquée pendant que l'éprouvette sèche, alors la superposition de cet état de compression, que l'on peut assimiler à une précontrainte, réduit fortement la traction de surface, voire l'annihile, ce qui réduit la fissuration et la relaxation associée. Il en résulte une meilleure transmission des dépressions capillaires et une part complémentaire de retrait de dessiccation. Le second mécanisme de fluage de dessiccation dit intrinsèque fait l'objet de plusieurs hypothèses quant à son origine. (Brooks et Johari, 2001) ont expliqué que le départ d'eau induit l'augmentation de l'amplitude des contraintes macroscopiques qui sont reprises par le squelette solide et, par conséquent, les déformations de fluage augmentent. L'hypothèse sur la diffusion de l'eau à l'échelle micropores et macropores a été avancée par (Bazant et Chern, 1985). Le passage de l'eau des pores des hydrates vers les pores capillaires peut provoquer la rupture des liaisons entre les feuillettes C-S-H, ce qui engendrerait à l'échelle macroscopique un surplus de déformations de fluage.

➤ Fluage en traction

La connaissance du fluage en traction permet d'évaluer des risques de fissuration des ouvrages. Même si, comme nous le verrons par la suite, nous n'avons pas mené ce type d'essai, il paraît intéressant de l'évoquer, puisque le BFUP étant caractérisé par une résistance en traction non négligeable, il peut être amené à subir des contraintes de traction maintenues dans le temps sans qu'il y ait un risque de fissuration instantanée du fait de sa résistance.

Selon (Bissonnette et al., 2007), les mécanismes de fluage propre à court terme en traction sont les mêmes qu'en compression. Sous l'action d'un chargement extérieur de traction, les pores des hydrates tendent à s'ouvrir et à adsorber l'eau libre contenue dans les pores capillaires, ce qui provoque l'expansion du matériau.

Le fluage en traction de dessiccation, ou de séchage, peut être expliqué par la théorie des mouvements d'eau interne (Brooks et Neville, 1977), (Domone, 1974). Au sein d'une éprouvette en séchage chargée en traction, les couches d'eau adsorbées sont soumises à la fois aux gradients hydriques par évaporation de l'eau et au chargement externe appliqué. Selon (Brooks and Neville, 1977), l'action simultanée de ces deux phénomènes peut faciliter le glissement des feuillettes de C-S-H. Ceci explique le fait que les déformations de fluage en traction en condition endogène soient moins importantes que celles en condition de séchage. (Kovler, 1999), (Bissonnette et Pigeon, 1995), et (Bissonnette et al., 2007) ont confirmé ce constat.

1.3.2.3.2.1. Déformations de fluage en compression des BFUP

Les déformations de fluage en compression des BFUP sont relativement faibles par rapport à celles des bétons ordinaires, mais sont plus élevées que celles des BHP. Le faible fluage des BFUP peut être expliqué par leur forte compacité. On peut également avancé le fait que le retrait, dont les cinétiques sont très intenses au jeune âge, et qui se développe avant l'application de la charge peut consommer un part significative de la capacité du matériau à se déformer dans le temps, notion que l'on appelle potentiel de déformation différée (Acker et Ulm, 2001).

Nous présentons dans le Tableau 1 - 12 les valeurs de fluage propre spécifique de différents BFUP dont l'âge et la durée de chargement varient selon l'étude.

Tableau 1 - 12 : Fluage propre spécifique des BFUP dont l'âge et la durée de chargement sont variables

Type de BFUP	Age de chargement (jours)	Taux de chargement (%)	Echéance (jours)	Fluage spécifique ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$)	Référence
BPR	2		-	46	(Loukili, 1996)
BPR	7		-	30	(Cheyrezy et Behloul, 2001)
BPR	180		-	10	
CEMTEC [®]	28	45	250	45	(Parant, 2003)
CEMTEC [®]	7	27	250	50	(Habel, 2004)
BFUP A *	2	40	350	22	(Francisco, 2012)
		25		20	

* Le BFUP A est soumis à un traitement thermique à 50°C

De manière générale, les valeurs de fluage spécifique obtenues varient entre 10 et 50 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$. Cette variation est due aux paramètres liés à la formulation notamment le rapport E/C, le volume de pâte (teneur en ciment et additions), la présence des fibres, le traitement thermique, et aux paramètres extérieurs tels que l'âge et le taux de chargement, la température et l'humidité. L'influence de ces paramètres sera détaillée ultérieurement.

1.3.2.3.2.2. Déformation de fluage en traction des BFUP

Comme expliqué précédemment, les données de la littérature concernant le fluage en traction des bétons sont assez limitées. Nous présentons tout d'abord les résultats de fluage en traction des BHP, puis ceux des BFUP. La prise en compte des déformations différées en traction est primordiale vis-à-vis de la durabilité, en particulier dans le cas où les matériaux cimentaires sont utilisés en couche mince pour la réparation (overlay). Dans cette configuration, la couche de réparation peut subir de fortes contraintes de traction du fait des

déformations empêchées par le support en vieux béton de la réparation, soit un matériau moins déformable et dont le retrait est fortement atténué.

Le Tableau 1 - 13 regroupe les valeurs de fluage propre spécifique en traction des BFUP de la gamme CEMTEC®.

Tableau 1 - 13 : Synthèse des résultats de fluage propre spécifique en traction des BFUP à taux et âges de chargement différents

Référence	Type de béton	Fibres (% volumique)	Age de chargement (jours)	Taux de chargement (%)	Fluage propre spécifique ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$)
(Kamen, 2007)	CEMTEC®	9	3	32 et 63	6 (2 jours) et 42 (38 jours)
(Bastien Masse, 2010)	BFUP-Polytechnique Montréal®	4	3/7/44	30	valeurs à 3 jours : 24/16 /10
(Rossi et al., 2013)	CEMTEC®	3	7	30	39 (30 jours)

Les valeurs de fluage propre spécifique en traction obtenues varient entre 10 et 39 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$. Les amplitudes des valeurs diminuent lorsque l'âge de chargement augmente. (Bastien Masse, 2010) a expliqué ceci par la rigidification de la matrice cimentaire dans le temps. (Bastien Masse, 2010) a relevé qu'un dosage supérieur en fibres pourrait diminuer les amplitudes de fluage propre spécifique de traction.

1.3.2.3.2.3. Paramètres influençant le fluage

De nombreux paramètres peuvent agir sur le fluage en compression et en traction. Ces paramètres peuvent être dissociés en deux catégories, ceux liés aux conditions extérieures et/ou de chargement tels que l'âge de chargement, l'intensité de la contrainte appliquée, le taux d'humidité et la température durant la phase d'essai, et ceux liés aux caractéristiques intrinsèques du matériau. Nous pouvons citer notamment le rapport E/C, le volume de pâte, le dosage en fibres, et en adjuvant, auxquels on pourra ajouter le traitement thermique appliqué avant l'essai de fluage qui, même si on ne peut pas à proprement parler de caractéristiques intrinsèques au matériau, modifie sa microstructure. Dans cette partie, nous présentons ces paramètres en nous focalisant sur les données expérimentales obtenues sur BFUP issues de la bibliographie, et principalement sur le fluage en compression que nous étudierons dans le cadre de ce projet de recherche.

➤ Influence des paramètres liés à la formulation

Le rapport E/C est un des paramètres qui influe le plus sur le fluage en compression des bétons. (Loukili, 1996) a montré que le fluage spécifique des BPR diminue avec le rapport E/C avec un écart est de 28% lorsqu'il passe de 0,17 à 0,13. En ce qui concerne le fluage en traction, la même tendance a été observée par (Bissonnette et Pigeon, 1995).

Le volume de pâte influe de manière non négligeable sur le fluage des bétons. (Loukili, 1996) a comparé le fluage propre spécifique en compression des BFUP de type BPR et de BHP, et a montré que celui des BFUP est deux fois plus important que celui des BHP, comme le montre la Figure 1 - 19. Malgré leur meilleure compacité, il attribue ce résultat au volume supérieur de pâte des BFUP.

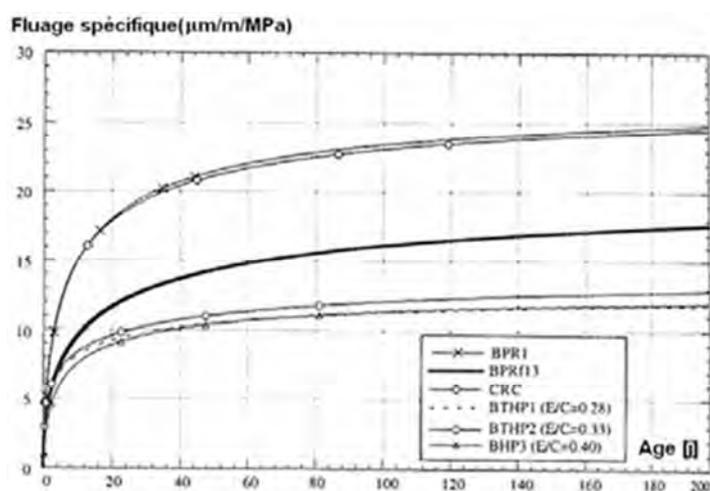


Figure 1 - 19: Comparaison du fluage propre spécifique en compression de Bétons à Ultra Hautes Performances BUHP de type BPR, de Bétons à Hautes (BHP) et Très Hautes Performances (BTHP), selon (Loukili, 1996)

L'incorporation des additions pouzzolaniques a également un effet sur le fluage en compression et en traction. Dans le cas du fluage en compression, l'ajout de fumée de silice permet de diminuer les déformations de fluage total (Mazloom et al., 2004) en raison d'une réduction de la porosité du béton. Cependant, l'effet sur le fluage en traction peut être différent selon la maturité du matériau : au jeune âge, les études de (Bissonnette et Pigeon, 1995), (Kovler, 1999), et (Pane et Hansen, 2002) ont montré que l'incorporation de la fumée de silice augmente le fluage ; en revanche, l'effet inverse est observé sur le béton plus âgé, en raison de la densification de la microstructure par réactions pouzzolaniques.

L'incorporation de fibres métalliques dans la matrice cimentaire a un effet variable puisqu'elles permettent soit de limiter, soit d'augmenter le fluage. Cela dépend de nombreux

paramètres tels que la taille et la géométrie (section, forme droite ou ondulée à ancrage) des fibres. Dans le cas du fluage en compression, l'introduction des fibres diminue fortement le fluage spécifique du béton fibré compact (CRC) (Loukili, 1996) comme le montre la Figure 1 - 20.

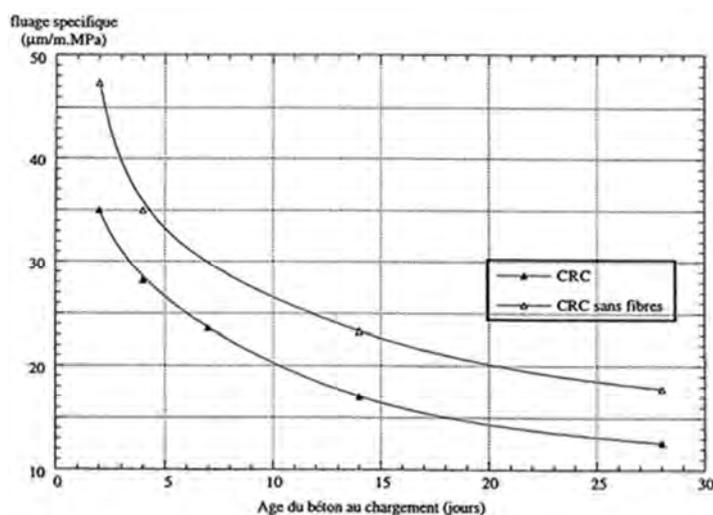


Figure 1 - 20: Influence de la présence de fibres sur le fluage propre spécifique en compression du CRC à différents âges de chargement (Loukili, 1996)

Selon l'auteur, l'ajout de 6% volumique de fibres métalliques de 12 mm de longueur et de 0,4 mm de diamètre dans la matrice du CRC permet de réduire de 25% le fluage propre spécifique, ceci étant valable quel que soit l'âge du chargement. (Loukili, 1996) a attribué ceci à la capacité potentielle des fibres à reprendre la contrainte appliquée lorsqu'elles sont perpendiculaires au sens de chargement.

Dans le cas de fluage en traction, (Bissonnette et al., 2007) ont montré que l'effet de fibres métalliques sur le fluage peut être différent selon le type de fibres utilisé. Les auteurs ont constaté une diminution du fluage lorsque 40 kg/m^3 de fibres ondulées sont incorporées, tandis que l'effet inverse est observé lorsque les fibres droites et lisses avec crochets aux extrémités sont ajoutées à dosage identique. Les auteurs ont expliqué ces résultats contradictoires en supposant que l'interface pâte/fibres est différente selon le type de fibres. Les fibres ondulées peuvent conduire à une meilleure adhérence avec la pâte par rapport aux fibres droites lisses avec crochets.

En ce qui concerne l'effet du traitement thermique sur le fluage en compression, (Loukili, 1996) a montré que les BFUP de type BPR avec fibres ayant subi un traitement thermique à 90°C et chargés après le traitement thermique, présentent un fluage propre spécifique

inférieur à 5 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$. L'effet de traitement thermique de type II sur le fluage en compression a été récemment étudié par (Francisco, 2012). La Figure 1 - 21 présente les résultats obtenus par cet auteur.

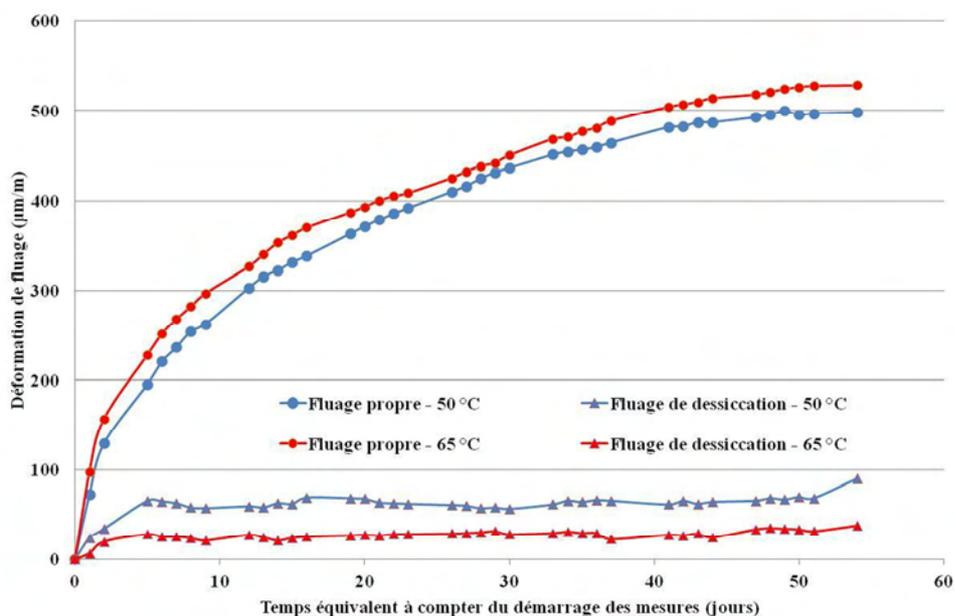


Figure 1 - 21 : Evolution des déformations différées de fluage en compression mesurées lors de l'étude relative à l'influence du traitement thermique selon (Francisco, 2012)

Les résultats montrent qu'après environ deux mois de suivi, le traitement thermique à 50°C conduit à des déformations de fluage propre légèrement inférieures à celles obtenues pour le BFUP à 65 °C. En revanche, les déformations de fluage de dessiccation du BFUP traité thermiquement à 65°C sont plus faibles que celles du BFUP traité à 50°C. L'auteur a justifié ces résultats : par la différence de 0,4 jour entre les âges équivalents calculés au moment du chargement et du démarrage des mesures ; par une différence de microstructure due à l'écart de température du traitement thermique ; par une différence d'humidité relative interne du béton due à la différence de température de la vapeur d'eau ; et par une différence de perte d'eau des éprouvettes (perte d'eau supérieure des éprouvettes à 65°C).

➤ Paramètres liés aux conditions extérieures

Comme expliqué précédemment, l'âge et le taux de chargement influent sur le fluage spécifique. De nombreuses études ont montré que la cinétique et l'amplitude du fluage diminuent si l'âge de chargement augmente du fait du durcissement du matériau (Loukili, 1996), et (Cheyrezy et Behloul, 2001). Ce comportement est bien connu et est conforme aux résultats de fluage en compression obtenus sur d'autres classes de bétons. Il est attribué au

comportement vieillissant de ces matériaux. D'autres chercheurs avancent le fait qu'un béton se caractérise par un potentiel de déformation différé intrinsèque et que le fluage sera dès lors d'autant plus faible qu'il aura subi, avant d'être chargé, une longue phase de retrait qui aura consolidé et entamé son potentiel de déformation différée (Acker et Ulm, 2001). La Figure 1 - 22 représentant l'évolution du fluage propre spécifique d'un BPR chargé à différents âges met clairement en évidence le fait que les cinétiques et amplitudes du fluage sont d'autant plus atténuées que l'âge du béton est avancé lorsque le chargement est appliqué. Sur cette figure, l'effet lié au traitement thermique, déjà présenté dans la partie précédente, peut également être constaté.

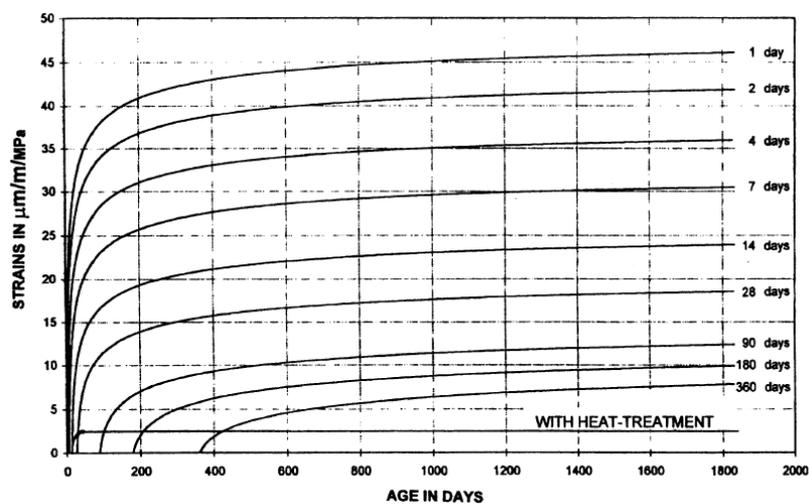


Figure 1 - 22 : Fluage propre spécifique en compression du BPR avec et sans traitement thermique en fonction de l'âge de chargement selon (Cheyrezy et Behloul, 2001)

D'autres résultats confirment ce phénomène comme les valeurs du fluage propre spécifique en compression de 46, 30 et 10 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ obtenues respectivement pour des BPR chargés à 1, 7 et 180 jours (Cheyrezy et Behloul, 2001).

En ce qui concerne le taux de chargement, le fluage des BFUP augmente avec l'intensité de charge appliquée. (Collepari et al., 1997) ont réalisé des essais de fluage sur des BFUP de type BPR subissant un traitement thermique à 90°C à taux de chargement de 9 et 33% de la résistance en compression du matériau. Les chargements ont été appliqués à 7 jours. Les résultats sont présentés sur la Figure 1 - 23.

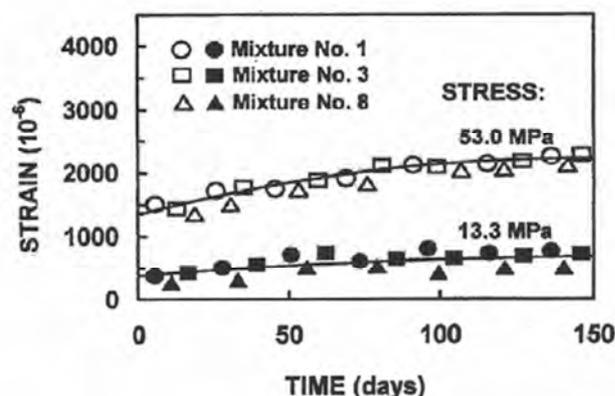


Figure 1 - 23 : Influence du taux de chargement sur les déformations de fluage de trois BFUP de type BPR (Bétons de Poudres Réactives) différents (Mixture No. 1, Mixture No. 2 et Mixture No. 3) (Collepari et al., 1997)

Nous pouvons constater une amplitude des déformations de fluage plus importante des BFUP avec un taux de chargement à 33% par rapport à ceux chargés à 9%. Les auteurs ont expliqué ces résultats par une augmentation des contraintes de relaxation au sein de la pâte cimentaire pour atteindre un état d'équilibre correspondant au niveau de chargement appliqué. Toutefois, les résultats ne sont pas exploités en fluage spécifique, ce qui aurait permis d'identifier la réelle influence de ce taux, et le type de fluage constaté, primaire ou secondaire.

L'étude récente de (Francisco, 2012) sur un BFUP ayant subi un traitement thermique à température modérée de 50°C, chargé à 25 et 40% de sa résistance en compression mesurée au moment de la mise en charge, a montré un effet peu significatif du taux de chargement sur le fluage propre spécifique. Un écart de 2 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ entre deux taux de chargement a été noté.

Durant l'essai de fluage, la température et l'humidité peuvent avoir des effets sur les déformations de fluage. Les études réalisées sur les BHP par (Ladaoui et al., 2011) ont montré que le fluage en compression augmente avec la température par activation thermique des phénomènes, notamment du fait de la diminution de la viscosité de l'eau qui facilite les mouvements de cette dernière et les glissements des feuillettes de C-S-H. Selon (Bazant et al., 2004), la température pourrait accélérer la rupture des ponts entre ces feuillettes, ce qui induirait la relaxation des contraintes et augmenterait ainsi le fluage. Jusqu'à présent, aucune étude ne s'est intéressée aux effets thermo-hydriques sur le fluage de BFUP.

1.3.3. Propriétés de transfert

En plus des performances mécaniques exceptionnelles, les BFUP possèdent une durabilité remarquable. L'évaluation de cette durabilité se base sur les indicateurs généraux de durabilités suivants (AFGC, 2013), qui sont mesurés par des essais en laboratoire sur éprouvettes ou sur prélèvements :

- la porosité accessible à l'eau (ou au mercure),
- la perméabilité à l'oxygène,
- le coefficient de diffusion des ions chlorures,
- la carbonatation,
- la teneur en portlandite.

1.3.3.1. Porosité

La caractérisation de la porosité et de la distribution poreuse des BFUP ont fait l'objet de plusieurs études. Une synthèse des valeurs de porosité accessible à l'eau et au mercure obtenues pour différents BFUP est présentée dans le Tableau 1 - 14.

Tableau 1 - 14 : Valeurs de la porosité des BFUP

Référence	Porosité à l'eau (%)	Porosité à mercure (%)
(Cheyrezy et al., 1995)	-	7
(Matte and Moranville, 1999)	-	6 – 7
(Vernet, 2002)	1,6 - 6	-
(Resplendino et al., 2003)	1,5 – 5	-
(Tafraoui, 2009)	6,1 – 7,1	-
(Cherkaoui, 2010)	0,8 – 1,6	5,86-8,57
(Kono et al., 2013)	4	-
(Piérard et al., 2013)	4,5	-
(Wang et al., 2014)	9,5	6,4

Sur la base des résultats obtenus, la porosité des BFUP est comprise entre 0,8 et 9,5%. Cette grandeur dépend des paramètres de formulation tels que le rapport E/C, la compacité du mélange et l'emploi du traitement thermique. A part les paramètres liés à la formulation, (Cherkaoui, 2010) a relevé un autre paramètre, qui est la méthode de mesure et en particulier la durée de saturation en eau sous vide. En effet, la durée recommandée par (AFPC AFREM, 1997) est de 28 heures. Cette durée est qualifiée d'insuffisante par l'auteur en raison d'une grande quantité de ciment anhydre restant, qui pourrait réagir durant la saturation et fausser la mesure. Ainsi, (PR NF P18-470) exige une valeur de la porosité à l'eau inférieure à 10% pour

être qualifié BFUP. En ce qui concerne la distribution poreuse des BFUP, elle présente un pic autour de 10nm (AFGC, 2013) et de 10 à 30 nm (Cherkaoui, 2010).

1.3.3.2. Perméabilité

Peu d'études ont été réalisées dans le but d'évaluer cet indicateur. (Roux et al., 1995) a obtenu une valeur de $2,5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ pour un BPR sans traitement thermique. (Tafraoui, 2009) n'a pas réussi à mesurer cet indicateur bien que les essais ont été effectués à pression maximale de 6 bars. L'auteur a considéré que les BFUP testés ont une perméabilité inférieure à $1,5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$. (Cherkaoui, 2010) a obtenu durant son étude des valeurs de $1,62 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ à $3,75 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ pour différents BPR extrudables. Ainsi, les recommandations de (AFGC, 2013) et la prénorme (PR NF P18-470) exigent des valeurs de perméabilité au gaz inférieures à $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$.

L'investigation de cet indicateur sous l'effet mécanique a été également réalisée. L'étude de la perméabilité équivalente au glycol d'un BFUP préalablement testé en traction directe a été réalisé par (Charron et al., 2008). Les éprouvettes prismatiques ont été endommagées en traction directe jusqu'à une déformation de 0,25%, puis déchargées comme l'illustre la Figure 1 - 24a. Les échantillons ont été ensuite prélevés à partir de ces éprouvettes prismatiques pour les essais de perméabilité au glycol. L'utilisation du glycol a été privilégiée à la place de l'eau afin d'éviter toutes réactions d'hydratation du ciment anhydre restant dans la matrice. Le coefficient de perméabilité équivalent à l'eau est ensuite déduit et présenté en fonction de déformation résiduelle sur la Figure 1 - 24b.

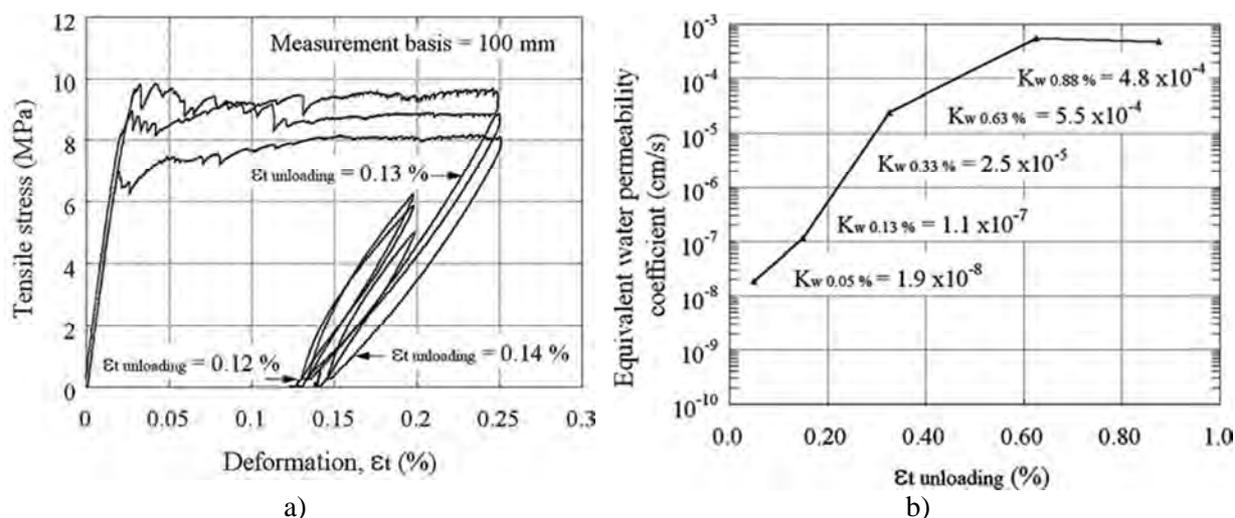


Figure 1 - 24 : a) Essai de traction jusqu'à une déformation de 0,23% ; b) Coefficient de perméabilité équivalente à l'eau du BFUP étudié (Charron et al., 2008)

Les résultats ont montré que le coefficient de perméabilité à l'eau équivalent du BFUP endommagé jusqu'à 0,13% de déformation résiduelle de traction après déchargement correspondant à la phase écrouissant comme le montre la Figure 1 - 24 est comparable à celui du béton ordinaire non fissuré. Pour une déformation résiduelle supérieure à 0,13% qui correspond à la phase adoucissant où la microfissure localisée est présente, la perméabilité augmente fortement de $1,9 \times 10^{-8}$ à $4,8 \times 10^{-4}$ cm/s. Il est important de souligner que le coefficient de perméabilité à l'eau équivalent calculé ne prend pas en compte les interactions entre les grains de ciment anhydre restant dans la matrice et l'eau. Ce phénomène pourrait être bénéfique en condition in situ et procurer une capacité d'auto-cicatrisation du matériau qui pourrait colmater, en partie, les microfissures de faibles ouvertures.

1.3.3.3. Diffusion des ions chlorures

La pénétration des ions chlorures est un des phénomènes responsables de la corrosion des armatures et de la dégradation des structures en béton armé en général. La diffusion traduit le phénomène de pénétration des ions sous l'effet d'un gradient de concentration. Les valeurs de coefficient de diffusion des ions chlorures obtenues par différentes études sont présentées dans le Tableau 1 - 15.

Tableau 1 - 15 : Valeurs du coefficient de diffusion des ions chlorures des BFUP

Référence	Type de BFUP	Coefficient de diffusion (m ² /s) x10 ⁻¹⁴
(Roux et al., 1995)	BPR	2
(Matte et Moranville, 1999)	BPR	1,1 – 2,1
(Vernet, 2002), (Resplendino et al., 2003)	Ductal®	2
(Tafraoui, 2009)	BFUP	1,7
(Cherkaoui, 2010)	BPR	8,8 – 13,8

Sur la base ces résultats, le coefficient de diffusion des ions chlorures des BFUP est compris entre 1×10^{-14} m²/s et $13,8 \times 10^{-14}$ m²/s. Il est en général faible par rapport aux bétons classiques (2×10^{-11} m²/s). La prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) exige une valeur maximale de 1×10^{-12} m²/s du coefficient de diffusion des ions chlorures pour que le matériau soit qualifié BFUP.

(Parant et al., 2007) ont réalisé une étude qui vise à évaluer les propriétés en flexion de CEMTEC® sous l'effet des sollicitations en flexion couplées à de la pénétration des ions chlorures par des cycles d'immersion et de séchage. Le taux de chargement correspond à 50% de la contrainte équivalente de flexion maximale, la concentration en NaCl de la solution est de 5g/l, et les cycles d'immersion et de séchage consistent en un jour en immersion et 6 jours en séchage. Après un an d'essai, aucune dégradation significative des propriétés mécaniques n'a été notée. Selon les auteurs, ces résultats peuvent être attribués à une teneur élevée en fibres dans la matrice (11% volumique) permettant d'obtenir un comportement écrouissant en traction accompagné de la formation de microfissures diffuses. Ces microfissures sont rapidement scellées suite à des réactions d'hydratation du ciment anhydre résiduel.

1.3.3.4. Carbonatation

La carbonatation est la réaction chimique entre le dioxyde de carbone présent dans l'air et la portlandite qui forme de la calcite qui induit une diminution du pH du béton entraînant un risque de corrosion des aciers. L'évaluation en laboratoire de cet indicateur a été réalisé par (Roux et al., 1995) et (Tafraoui, 2009). Dans ces études, les échantillons de plus de 28 jours ont été placés dans une ambiance accélérée avec de 50 à 100% en CO₂. Les auteurs n'ont pas enregistré de carbonatation sur les BFUP testés.

(Andrade et al., 2013) ont étudié la carbonatation à long terme de poutres en BFUP armées. Ces poutres ont été soumises à un chargement de flexion quatre points dont la montée en charge a été faite par palier de 10, 30, et 55 MPa afin d'obtenir des ouvertures de fissures

variant de 0,05 à 0,1 mm. Certaines ont été ensuite exposées en condition extérieure, et d'autres ont été conservées à l'intérieur du laboratoire. Après 16 ans d'exposition, la corrosion des armatures acier et la carbonatation du béton sont investiguées. Les résultats montrent que les armatures sont maintenues en état de passivation malgré la présence des ouvertures de fissures induites par le chargement. Une épaisseur du béton carbonaté de 1mm environ est mesurée, ce qui montre une excellente résistance à l'environnement du BFUP étudié.

1.3.3.5. Teneur en portlandite

La teneur en portlandite est un indicateur de durabilité puisque la dégradation chimique cet hydrate intervient dans deux pathologies du béton. Dans le cas de l'alcali-réaction, elle peut se comporter comme une réserve en ions calcium permettant de réapprovisionner la solution par dissolution au fur et à mesure des réactions pouzzolaniques, et dans le cas de la carbonatation, elle est dégradée par le dioxyde de carbone. En ce qui concerne les BFUP, (AFGC, 2013) considère que toute la portlandite est consommée par les réactions pouzzolaniques durant l'hydratation.

1.3.3.6. Retours d'expériences

Le retour d'expérience in situ vis-à-vis de la durabilité des structures en BFUP se dévoile à travers de nombreuses études. On peut notamment citer celles de (Toutlemonde et al., 2009) où deux poutrelles en BPR préfabriquées en 1996, placées ensuite au pied d'un aéroréfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom ont été investiguées vis-à-vis de la durabilité. Après 2 ans de service, les échantillons ont été prélevés et testés. Les résultats ont montré :

- un maintien des performances mécaniques (résistance en compression et le module d'élasticité de Young), donc pas de dégradation interne du matériau ;
- une porosité accessible à l'eau très faible (4,3%) ;
- une profondeur de carbonatation très faible (1mm) ;
- l'absence de pénétration significative d'ions chlorure ;
- l'absence de corrosion des fibres (pH=12,35).

(Kono et al., 2013) ont réalisé les essais de durabilité sur les échantillons prélevés sur la passerelle Sakata-Mirail (Japon), qui a été construite en 2002. L'ouvrage se situe dans un environnement corrosif en ambiance marine. Après 10 ans d'exposition, la pénétration des ions chlorures a été mesurée. Les résultats ont montré que l'épaisseur de pénétration est

inférieure à 2mm, ce qui correspond à un coefficient de diffusion de l'ordre de $3,9 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$. Les mesures des résistances mécaniques ont été également réalisées et ont montré un maintien, voire une amélioration, de la résistance en compression (238 MPa) et en flexion (46 MPa).

(Toutlemonde et al., 2013) ont évalué les propriétés mécaniques et de durabilité sur les échantillons carottés d'un tablier de pont qui se situe à Bourg-Lès-Valence. Après 12 ans de service, le dosage en chlorures sur béton de cœur par extraction et titration a révélé une teneur nulle. La mesure sur béton de surface a montré une faible quantité de chlorure (0,02g de chlorure pour 100g de béton sans fibres). La porosité accessible à l'eau mesurée est de 7,6%. La résistance en compression moyenne mesurée est de 263 MPa, ce qui présente 20% d'augmentation par rapport à celle déterminée à 28 jours.

(Thomas et al., 2012) ont étudié la durabilité de trois poutres en BFUP situées à Treat Island (Etats Unis) depuis 1996. Les conditions d'exposition sont extrêmement agressives avec deux cycles de marée par jour. Après 13 ans d'exposition, la pénétration des ions chlorures est de 7 mm.

1.3.3.7. Evaluation des risques potentiels liés à la nature des BFUP

Le bilan des indicateurs démontrent la durabilité remarquable de ces matériaux. Néanmoins, de nombreuses réflexions par rapport à sa tenue dans le temps et liées à leur nature particulière doivent être considérées :

- la stabilité dans le temps des adjuvants utilisés à de forts dosages pour ce type de béton ;
- la réhydratation d'une grande quantité de ciment non hydraté présent dans la matrice (E/C faible) ;
- la corrosion des fibres métalliques, et les agressions chimiques des fibres polymères.

Selon (AFGC, 2013), la stabilité dans le temps des adjuvants est conditionnée plutôt par celle du béton et non par le dosage en adjuvant. En effet, les molécules d'adjuvant se fixent sur les surfaces minérales pendant le gâchage et améliorent la fluidité du mélange. Durant la prise, ces molécules sont souvent piégées dans la structure inter-feuillet des hydrates et peuvent réagir avec ce dernier formant des produits qui contiennent 70% de matière organique. Les produits formés restent généralement stables dans le milieu basique du béton à la condition que celui-ci ne subisse pas des agressions chimiques. Dans certains cas, ces

molécules d'adjuvant peuvent subir une hydrolyse alcaline qui n'entraîne aucun effet sur les performances mécaniques du béton. Le dosage maximal en superplastifiant peut aller jusqu'à 5% en extrait sec par rapport au ciment. Ceci confirme que les BFUP ne subissent aucun effet provenant des adjuvants dans le temps. En revanche, ce fort dosage adjuvant pourrait les écarter d'une utilisation dans certains ouvrages pour lesquels une quantité élevée en composés organiques est préjudiciable (ouvrages de stockage des déchets radioactifs par exemple).

Le rapport E/C faible engendre une forte proportion de ciment anhydre (AFGC, 2013). Ainsi, des interrogations se posent sur l'éventualité d'un gonflement structural des BFUP lorsque l'eau pénètre dans la matrice cimentaire. Pour y répondre, de nombreuses études ont été menées et ont conclu que le ciment anhydre résiduel est plutôt bénéfique pour les BFUP. En effet, il permet :

- d'augmenter le module de Young de la pâte de ciment puisque le module de Young du clinker est de 120 GPa d'après (Boumiz, 1995) cité par (Vernet et al, 1998) ;
- de cicatrifier les microfissures par condensation capillaire et formation d'hydrates ;
- de résister aux agressions chimiques en maintenant le niveau de pH basique nécessaire à la passivation des aciers.

Par ailleurs, les essais laboratoires réalisés au CSIC (AFGC, 2013) et les essais en vraie grandeur à Montréal, dans une zone de marnage du St Laurent, ont montré que les ouvrages en BFUP présentent une absence de corrosion en profondeur des fibres. Les traces de corrosion observées sont uniquement surfaciques. Ceci peut toutefois être préjudiciable à l'esthétique des pièces de parement. Il est donc préférable d'utiliser dans ce cas des fibres synthétiques.

Dans le cas d'utilisation des fibres polymères dans les BFUP, celles-ci peuvent être détériorées par oxydation et par la lumière UV. Cependant, les BFUP se caractérisent par une faible porosité, qui limite la pénétration des agents chimiques agressifs dans la matrice cimentaire, comme le montrent les données relatives à la diffusion des ions chlorures. La dégradation des fibres polymères peut néanmoins subvenir lorsque le matériau est fissuré laissant passer l'oxygène et les UV. Il existe à l'heure actuelle des produits de protection incorporés pendant le malaxage permettant de ralentir et d'empêcher ces dégradations.

1.4. Aspects réglementaires et dimensionnements

Il n'existe pas à l'heure actuelle de normes françaises ou européennes sur les matériaux BFUP ou sur le dimensionnement de structures en BFUP. Toutefois, des prénormes sont en phase de finalisation de rédaction et devraient voir le jour en 2016 : la prénorme relative aux spécifications des matériaux BFUP (PR NF P18-470) et celle relative au calcul et au dimensionnement en BFUP (PR NF P18-710). Elles s'appuient sur les recommandations provisoires pour BFUP (AFGC, 2002) qui constituaient un premier guide d'utilisation et de calcul des structures en BFUP. Ce document était lui-même basé sur l'ancien règlement français pour les éléments en béton précontraint (BPEL, 1999) et sur les recommandations (AFREM, 1995) pour les bétons fibrés. Une mise à jour de cette recommandation au format de l'Eurocode 2 a vu le jour en 2013 (AFGC, 2013), avec la prise en compte du coefficient d'orientation de fibres (K) que nous expliciterons ultérieurement. Il existe également les recommandations (RILEM TC162-TDF, 2000) pour le dimensionnement des structures en béton fibré ordinaire (BRF) avec ou sans armature conventionnelle. La recommandation japonaise pour BFUP publiée en 2005 (JSCE, 2004) s'inspire fortement de celle de l'AFGC (AFGC, 2002).

Conformément à notre projet de recherche qui vise à concevoir et réaliser des éléments de structures préfabriqués, nous nous sommes intéressés initialement aux méthodes existantes de calcul de structures en BFUP. Etant donné la finalité industrielle à court terme de ce travail de recherche, la proximité de la parution des prénormes, et compte tenu de la première application qui a pu être réalisée en fin de thèse, nous nous sommes limités et focalisés sur les prénormes BFUP à partir desquelles nous avons réalisé un dimensionnement d'éléments de structure qui sera décrit dans l'ultime chapitre. Nous aborderons donc les points essentiels concernant l'aspect réglementaire et le dimensionnement des structures en BFUP. Ces informations sont tirées des recommandations BFUP (AFGC, 2002, 2013), de la prénorme BFUP concernant l'aspect matériau (PR NF P18-470) et l'aspect dimensionnement (PR NF P18-710). Dans un premier temps, les considérations générales seront traitées, avec les classifications des BFUP vis-à-vis du comportement en compression et en traction, et les coefficients de sécurité à prendre en compte. La présentation du principe de la méthode de dimensionnement fera l'objet de la deuxième partie. La méthode de dimensionnement présentée se base sur la prénorme dimensionnement des structures en BFUP (PR NF P18-710) et concerne uniquement les BFUP-S structuraux. Comme nous l'avons indiqué, cette méthode sera appliquée lors d'une application industrielle et fera l'objet du chapitre 6 de ce mémoire.

1.4.1. Considérations générales

Avant de détailler la méthode de dimensionnement, il faut tout d'abord s'attarder sur l'aspect matériaux, définir les classes de matériaux, et préciser quels sont les BFUP utilisables dans des solutions structurales.

1.4.1.1. Classes associées au type de fibres et de résistance en compression

Les BFUP peuvent être classés selon la nature des fibres utilisées. Ceux incorporant des fibres métalliques sont appelés BFUP de type M. Dans le cas contraire, ils sont désignés BFUP de type A (Autre).

Ils sont aussi classés en fonction de leur résistance caractéristique en compression, mesurées sur éprouvettes cylindriques 11x22 cm à 28 jours selon le Tableau 1 - 16.

Tableau 1 - 16: Classes de résistance à la compression pour les BFUP (PR-NF P18-470)

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres
	f_{ck-cyl} en MPa
BFUP 130	130
BFUP 150	150
BFUP 175	175
BFUP 200	200
BFUP 225	225
BFUP 250	250

Pour les BFUP de type M, en fonction de leur résistance caractéristique à la compression, la prénorme (PR NF P18-470) désigne :

- les BFUP de type M dont la résistance caractéristique est au moins de 150 MPa sont notés BFUP-S
- les BFUP de type M dont la résistance caractéristique à la compression est supérieure à 130 MPa et strictement inférieure à 150 MPa sont notés BFUP-Z

Seuls les BFUP-S sont utilisables pour des applications structurales et sont concernés par la prénorme dimensionnement des structures en BFUP (PR NF P18-710).

1.4.1.2. Classes de comportement en traction

Le comportement en traction des BFUP est obtenu par analyse inverse des résultats d'essais de flexion. Tout d'abord, les BFUP doivent avoir une contrainte limite élastique caractéristique à 28 jours $f_{ctk,el}$ supérieure à 6 MPa. Ils doivent également se caractériser par

un comportement suffisamment écrouissant en flexion afin de satisfaire la condition de ductilité du matériau. Par conséquent, l'inégalité suivante doit être vérifiée :

$$\frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \frac{\sigma(w)}{K} dw \geq \max(0,4f_{ctm,el}; 3 \text{ MPa})$$

Où $w_{lim} = 0,3$ mm, est l'ouverture de fissure limite,

$f_{ctm,el}$ est la contrainte limite élastique moyenne en traction,

$\sigma(w)$ est la contrainte caractéristique post-fissuration en fonction de l'ouverture de fissure w .

K est le facteur d'orientation de fibres traduisant l'effet de la mise en œuvre du BFUP dans la structure. Il est déterminé par les essais de traction directe ou indirecte (par flexion) sur les éprouvettes prélevées à partir de l'élément coulé lors de l'épreuve de convenance. Le rapport entre les valeurs de résistance obtenues au laboratoire durant l'épreuve d'étude et celles déterminées sur les éprouvettes prélevées correspond à la valeur de K . Pour le prédimensionnement, le coefficient K peut être pris égal à 1,25 pour les vérifications globales (moment résistant, ou effort tranchant...), et à 1,75 pour les vérifications locales (diffusion de la précontrainte par exemple). La prise en compte de ce coefficient d'orientation des fibres se fait au niveau de la loi de comportement en traction post-fissuration.

Les classes de comportement en traction sont obtenues par comparaison de la contrainte élastique $f_{ct,el}$ avec celle au pic f_{ctfk} de la phase post-fissuration pour la courbe moyenne et la courbe caractéristique, en intégrant la prise en compte sur la phase post-fissuration du facteur d'orientation K . C'est-à-dire que les valeurs de la courbe intrinsèque caractéristique en traction post-fissuration ($f_{ctfk} - w$) obtenue doivent être divisées par K . Dans le cas où le pic local n'est pas présent, la valeur de f_{ctfk} est égale à celle correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 mm.

- Le BFUP est de classe T3 « très écrouissant » lorsque $f_{ctfk} \geq f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique.
- Le BFUP est de classe T2 « peu écrouissant » lorsque $f_{ctfk} \geq f_{ct,el}$ pour la courbe moyenne et que $f_{ctfk} < f_{ct,el}$ pour la courbe caractéristique.

- Le BFUP est de classe T1 « écroissant en flexion, adoucissant en traction directe » lorsque $f_{ctfk} < f_{ct,el}$ pour la courbe moyenne et pour la courbe caractéristique.

Il est important de distinguer les lois de comportement en traction des éléments de type épais et des plaques minces. Les éléments épais sont des éléments dont leur épaisseur e est telle que : $e > 3l_f$. Les éléments minces sont les éléments dont leur épaisseur e telle que : $e < 3l_f$, avec l_f la longueur des fibres (PR NF P18-710).

Dans le cas des éléments épais, les lois de comportement en traction simplifiées sont présentées sur les Figure 1 - 25 et Figure 1 - 26.

Les BFUP de classe T3 :

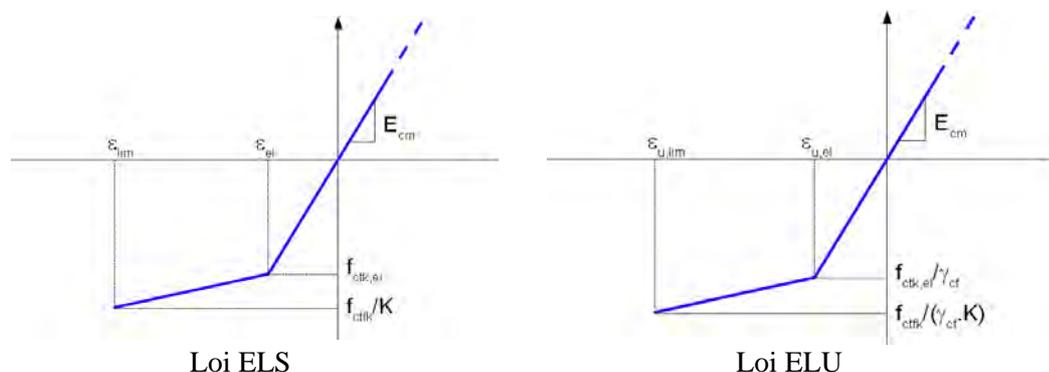


Figure 1 - 25 : Loi pour les BFUP de classe T3 (obtenue directement en $\sigma(\epsilon)$) selon (PR NF P18-710)

Les BFUP de classe T1 et T2 :

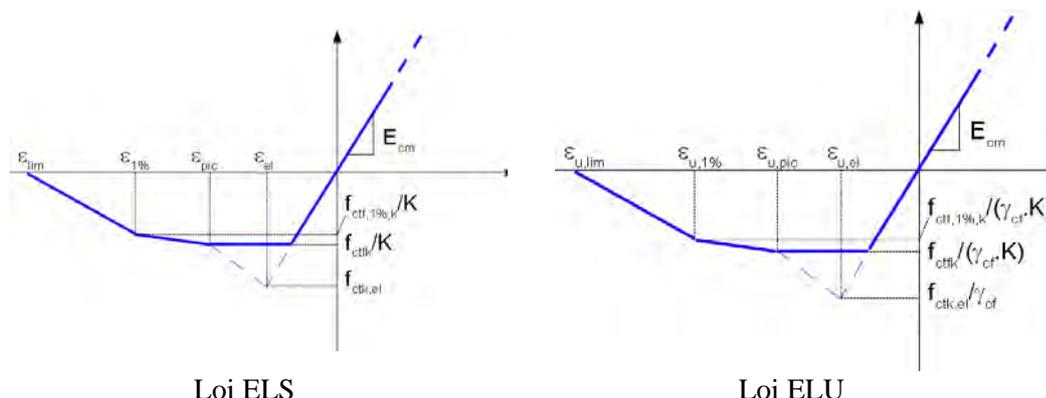


Figure 1 - 26 : Loi conventionnelle pour les BFUP de classe T1 ou T2 (issue de courbe $\sigma(w)$) selon (PR NF P18-710)

Les paramètres donnés dans ces lois de calcul sont :

- $f_{ctk,el}$ est la résistance élastique caractéristique, et E_{cm} est le module de Young. Ces paramètres sont déterminés expérimentalement.

- $\varepsilon_{pic} = \frac{w_{pic}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}}$ à l'ELS

- $\varepsilon_{u,pic} = \frac{w_{pic}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} E_{cm}}$ à l'ELU

avec w_{pic} ouverture de fissure correspondant au pic local, ou 0,3 mm s'il n'y a pas de pic.

- $\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}}$ à l'ELS

- $\varepsilon_{u1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} E_{cm}}$ à l'ELU

avec $w_{1\%} = 0,01H$, H étant la hauteur du prisme d'essai de flexion.

- $\varepsilon_{u,lim} = \varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$ dans le cas des BFUP adoucissants, l_f étant la longueur d'une fibre.

où $l_c = \frac{2}{3}h$, longueur caractéristique (avec h hauteur de la section).

- $\varepsilon_{u,lim}$ et ε_{lim} résultent des essais de caractérisation dans le cas des BFUP écrouissants (valeur plafonnée à 2,5 ‰ sauf si une caractérisation à l'aide d'essais de traction directe a été effectuée).

Dans le cas des plaques minces, les lois de comportement en traction simplifiées sont présentées sur les Figure 1 - 27 et Figure 1 - 28 (PR NF P18-710) :

Les BFUP de classe T3 :

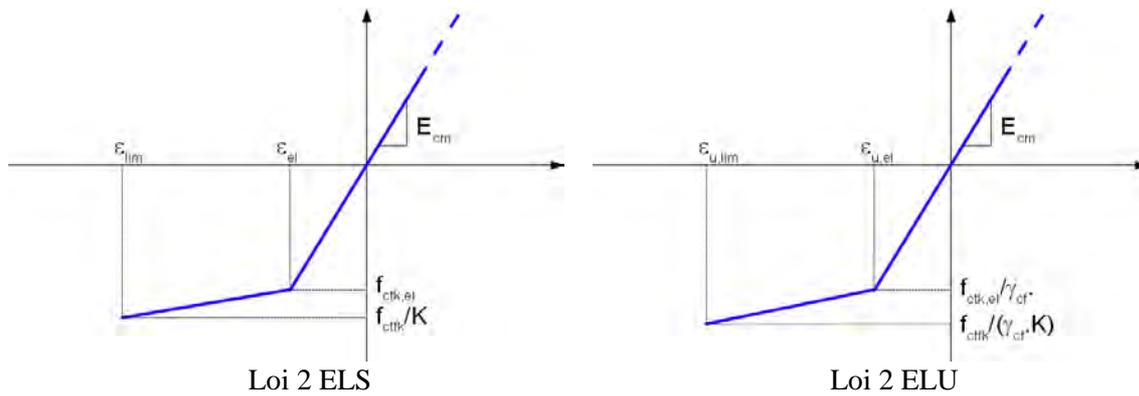


Figure 1 - 27 : Loi conventionnelle n°2 pour les éléments minces (PR NF P18-710)

Les BFUP de classe T1 et T2 :

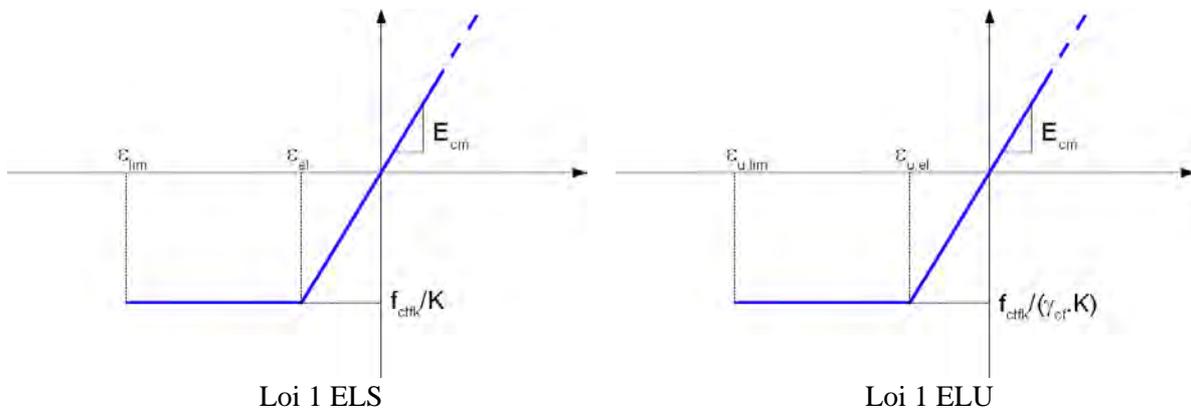


Figure 1 - 28 : Loi conventionnelle n°1 pour les éléments minces (PR NF P18-710)

Nous précisons que la loi n°1 n'est utilisable que pour des éléments soumis à de la flexion simple ou à de la flexion-compression. Tandis que la loi n°2 est utilisable quel que soit le type de sollicitation, à condition que le matériau soit réellement écrouissant.

Les paramètres de ces lois sont les suivants :

- $f_{ctk,el}$ est la limite d'élasticité caractéristique en traction.
- f_{ctfk} est la résistance caractéristique post-fissuration de traction résultant des essais de caractérisation.
- $\epsilon_{u,lim}$ est la déformation maximale en traction résultant des essais de caractérisation. Cette valeur est limitée à 2,5 ‰ sauf si la caractérisation a été effectuée à l'aide d'essais de traction directe.

1.4.1.3. Prise en compte des coefficients partiels de sécurité

Le coefficient partiel de sécurité γ_{cf} relatif au béton fibré en traction pour les vérifications aux ELU doit être également pris en compte. La valeur à considérer dépend de la situation de l'ouvrage comme le montre dans le Tableau 1 - 17.

Tableau 1 - 17: Coefficient γ_{cf} relatif au béton fibré en traction

$\gamma_{cf} = 1,3$	Situations de projet durable/transitoire
$\gamma_{cf} = 1,05$	Situations de projet accidentelles

La valeur du coefficient partiel de sécurité relatif au béton en compression γ_c à prendre en compte selon les différentes situations et états limites est détaillée dans le Tableau 1 - 18.

Tableau 1 - 18: Coefficient γ_c relatif au béton pour la limite en compression

	ELS	ELU
Situations de projet durable/transitoire	1	1,5
Situations de projet accidentelles		1,2
Situations sismiques		1,3

1.4.2. Base de calcul des structures en BFUP

La vérification de la section sous chargement imposé se fait aux états limites ultimes (ELU) y compris la vérification de la non-fragilité. La vérification de l'effort tranchant se fait également aux ELU. Aux états limites de service (ELS), il convient de vérifier les limitations des contraintes, la maîtrise de la fissuration et les flèches.

1.4.2.1. Etats limites ultimes (ELU)

Dans cette partie, nous nous limitons à traiter la méthode de calcul pour les éléments en BFUP non armés, et non précontraints, soumis à la flexion simple, ainsi que la vérification vis-à-vis de l'effort tranchant, puisqu'il s'agit du type de dimensionnement qui sera mené lors de l'application présentée dans le chapitre 6.

1.4.2.1.1. Vérification de la section soumise à la flexion simple

Le but est donc de déterminer le moment résistant maximum de la section considérée à une limite de déformation, sous chargement à l'ELU, et de vérifier qu'il est supérieur à la valeur du moment fléchissant maximal M_{Ed} calculé aux combinaisons d'actions réglementaires ELU selon l'Eurocode 0 (NF EN 1990, 2003).

Dans le cas des BFUP écrouissants ou les éléments de type plaque mince, les efforts résistants des sections sont calculés à partir d'un diagramme linéaire de déformation compris dans un domaine défini par des déformations limites dites pivots, comme l'illustre la Figure 1 - 29 (cas BFUP non armé).

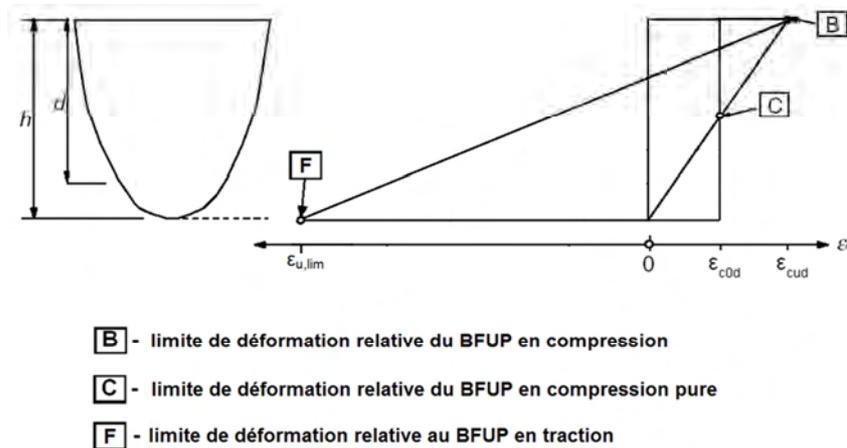


Figure 1 - 29: Diagramme des déformations relatives admissibles à l'état-limite ultime pour le BFUP non armé (PR NF P18-710)

Pour ce cas, les limites des pivots sont les suivants :

- Pivot B est celui qui correspond au raccourcissement limite ϵ_{cud} du BFUP sur la fibre la plus comprimée de la section.
- Pivot C est celui qui correspond au raccourcissement limite ϵ_{c0d} du BFUP en compression pour la part due uniquement à l'effort normal.
- Pivot F : Lorsque la loi en traction retenue pour le calcul ne possède pas de branche descendante (par exemple lois conventionnelles des BFUP de classe T3 ou lois conventionnelles pour éléments minces), le pivot F est celui qui correspond à l'allongement limite $\epsilon_{u,lim}$ du BFUP sur la fibre la plus tendue de la section. Pour les autres cas, le moment résistant est obtenu pour une déformation de la fibre la plus tendue inférieure à $\epsilon_{u,lim}$.

Il est important de noter que cette règle des pivots ne peut s'appliquer aux BFUP adoucissants T1 ou légèrement écrouissants T2, qu'à condition de négliger la résistance du béton dans la partie fissurée. Dans ce dernier cas, on n'impose pas de pivot et on utilise directement les lois de comportement en compression-traction définies à partir des essais expérimentaux.

Détermination du moment résistant de la section : cas des éléments épais

La règle des pivots peut être utilisée pour déterminer le moment résistant de la section, la résistance du béton dans la partie fissurée est donc négligée. Les lois de comportement en compression et en traction simplifiées sont prises en compte. Les paramètres qui constituent ces lois de comportement simplifiées sont déterminés par les relations présentées précédemment.

Il est également possible d'utiliser la méthode itérative (AFREM, 1995) pour déterminer le moment résistant de la section. L'équilibre des efforts normaux et des moments internes et externes permet d'écrire les équations suivantes :

$$N_b + N_f = 0 = \frac{E \cdot \phi_m \cdot b \cdot h^2}{2} [(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2] + \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w_0} \int_0^{w_0} \sigma_f \cdot dw$$

$$M_b + M_f = M_{Rd}$$

$$= \frac{E \cdot \phi_m \cdot b \cdot h^3}{3} [(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b + \alpha \cdot h \cdot N_f - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w_0} \int_0^{w_0} \sigma_f \cdot w \cdot dw$$

où :

- N_b : effort normal interne de la partie non fissurée, et N_f est celui de la partie fissurée.
- M_b : moment interne de la partie non fissurée, et M_f est celui de la partie fissurée.
- b : largeur du prisme (mm).
- h : hauteur du prisme (mm).
- E : module d'élasticité du matériau (MPa).
- α la hauteur relative de la fissure.
- α_n la hauteur relative de l'axe neutre.
- ϕ_m la courbure de la partie non fissurée (mm^{-1}).
- w_0 : ouverture de fissure (mm).

La position de l'axe neutre est donnée par la relation :

$$f_{ctk,el} = E \cdot \chi_m \cdot b \cdot h \cdot (\alpha - \alpha_n)$$

L'ouverture de fissure w_0 s'exprime en fonction de la courbure ϕ_m par la relation suivante :

$$w_0 = [\phi_m + 2 \cdot \phi_e] \frac{2 \cdot (\alpha h)^2}{3}$$

Nous disposons de la loi de comportement en traction à l'ELU. Le moment résistant peut donc être déterminé en faisant varier la courbure ϕ_m jusqu'à atteindre les limites réglementaires de la limite de déformation.

Lorsque le moment sollicitant est inférieur au moment résistant, la section est justifiée.

Condition de non-fragilité

Il convient également de vérifier la condition de non fragilité. Cette vérification consiste à :

- calculer le moment résistant élastique juste avant la fissuration (M_{rel}),
- calculer le moment résistant ultime de la section fissurée (M_{Rd}) et s'assurer qu'il est supérieur au moment résistant élastique (M_{rel}).

1.4.2.1.2. Vérification de l'effort tranchant

La justification vis-à-vis de l'effort tranchant consiste à vérifier que l'effort tranchant sollicitant maximal aux ELU (V_{Ed}) est inférieur à l'effort tranchant résistant ($V_{Rd,total}$). L'effort tranchant résistant ($V_{Rd,total}$) est égal à la plus petite des deux valeurs (V_{Rd} et $V_{Rd,max}$) ; où $V_{Rd,max}$ désigne la résistance des bielles de compression du béton ; V_{Rd} désigne la résistance des tirants en traction du béton :

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f}$$

Avec $V_{Rd,c}$ terme de participation de béton ;

$V_{Rd,f}$ terme de participation des fibres.

Pour une section non armée, non précontrainte :

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$

où f_{ck} est la résistance caractéristique en compression, exprimée en MPa ; b_w est la plus petite largeur de la section droite tendue en m.

$$\text{Et } k = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} \text{ si } \sigma_{cp} \geq 0 \quad \text{ou} \quad k = 1 + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctk,el}} \text{ si } \sigma_{cp} < 0$$

avec $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ où N_{Ed} est l'effort normal agissant sur la section droite et A_c est l'aire de la section droite de béton

Le terme $V_{Rd,f}$ est l'effort tranchant résistant apporté par les fibres :

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fv} \sigma_{Rd,f}}{\tan \theta}$$

Dans le cas de BFUP adoucissant ou peu écrouissant :

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K \gamma_{cf}} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma_f(w) dw$$

Où :

$$w_{lim} = \max(w_u, w_{max}) ;$$

$A_{fv} = b_w z$ est l'aire d'action des fibres où z est le bras de levier des efforts internes ;

θ est l'inclinaison sur l'axe neutre de la contrainte principale de compression. Il convient de retenir $\theta = 30^\circ$ comme valeur minimale ;

w_u est l'ouverture ultime des fissures atteinte à l'ELU en flexion composée, sur la fibre extrême sous moment agissant dans la section ;

w_{max} est l'ouverture maximale admissible des fissures.

La résistance des bielles de compression du béton ($V_{Rd,max}$) est égale à :

$$V_{Rd,max} = 2 \times 1,14 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{\frac{2}{3}} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

1.4.2.2. Vérifications aux Etats Limites de Service (ELS)

Les vérifications à réaliser à l'ELS sont : les limitations de contrainte en traction ; la maîtrise de la fissuration ; et les limitations des flèches.

➤ Vérification de la contrainte

Dans le cas de BFUP non armé, non précontrainte, la limite de contrainte est la contrainte élastique en traction $f_{ctk,el}$.

Le calcul de la contrainte en traction maximale de la section aux ELS notée σ_t est réalisé dans un premier temps. Cette valeur sera comparée avec celle de $f_{ctk,el}$. Si σ_t est supérieure à $f_{ctk,el}$, la vérification se fait en section non fissurée. Dans le cas contraire, il convient de justifier en section fissurée.

➤ Calcul de l'ouverture de fissure

La valeur limite de l'ouverture de fissure w_{max} a pour objectif de préserver la pérennité des fibres et/ou des armatures. Dans le cas des BFUP sans aucune armature active ou passive adhérente, l'étude de l'équilibre de la section plane fissurée, en contraintes moyennes, ayant permis déterminer la déformation ε_t sur les fibres les plus tendues, il convient de vérifier que l'ouverture de fissure calculée demeure inférieure à une valeur limite w_{max} qui est fonction de la classe d'exposition et de la combinaison d'actions ELS (Tableau 1 - 19) :

$$w_t = \left(\varepsilon_t - \frac{f_{ctm,el}}{E_{cm}} \right) \cdot l_c \leq w_{max}$$

où :

$f_{ctm,el}$ est la contrainte élastique moyenne en traction.

l_c est la longueur caractéristique : $l_c=2/3h$ où h est la hauteur de la section.

E_{cm} est le module d'élasticité.

w_{max} est la limite de l'ouverture de fissure.

Il est important de noter que pour les BFUP de classe 2 écrouissants en loi moyenne et adoucissants en loi caractéristique, cette vérification doit être faite en loi caractéristique. Il faut donc prendre $f_{ctk,el}$ au lieu de $f_{ctm,el}$.

A défaut d'exigences plus détaillées, les valeurs limite de l'ouverture de fissure w_{max} recommandées sont celles du Tableau 1 - 19.

Tableau 1 - 19 : Limitations de l'ouverture de fissure (w_{max}) à l'ELS (PR NF P18-710)

Classe d'exposition	Eléments en BFUP armé et éléments en BFUP précontraint à armatures non adhérentes	Eléments en BFUP précontraint à armatures adhérentes	Eléments en BFUP non armé et non précontraint	
	Combinaison quasi permanente	Combinaison caractéristique	Combinaison fréquente	Combinaison caractéristique
X0, XC1	0,3	0,2	0,3	0,3
XC2, XC3, XC4	0,2 ⁽¹⁾⁽²⁾	0,1 ⁽¹⁾	0,05	0,2 ⁽¹⁾
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	0,1 ⁽¹⁾⁽²⁾	Limitation traction à $\frac{2}{3} \min (f_{ctm,el}, f_{ctfm}/K)$	0,05	0,1 ⁽¹⁾
(1) Cette valeur repose sur la possibilité de cicatrisation du BFUP qui vient ainsi protéger les fibres				
(2) La fissuration peut être autorisée dans le cas où la structure est soumise à des charges variables importantes, à condition de ne pas prendre en compte la résistance apportée par les fibres dans les zones potentiellement fissurées				

➤ Vérification des flèches

Des vérifications par rapport à des flèches potentiellement excessives peuvent être exigées suivant les projets. Dans les sections non fissurées, où la contrainte de traction maximale demeure inférieure à $f_{ctm,el}$, la courbure est $\chi_I = M/EI$, avec I étant l'inertie brute non fissurée de la section.

Pour les structures en BFUP de classe T1 et T2 non armées, le calcul d'équilibre en section plane fissurée à partir de la loi ($\sigma-w$) transformée en loi ($\sigma-\varepsilon$) permet de connaître la déformation maximale du BFUP comprimé (ε_c) et la hauteur comprimée (x). La courbure maximale est donc : $\chi_{II} = \varepsilon_c / x$.

Il est ensuite admis que la variation de la courbure est parabolique en fonction de la distance à la fissure (y) : $\chi(y) = \chi_I + (\chi_{II} - \chi_I)[1 - y/(\alpha h)]^2$ avec αh la hauteur fissurée.

Dans les zones où coexistent plusieurs fissures, la courbure moyenne est donnée par la formule suivante : $\chi_{II,moy} = 2 \chi_I / 3 + \chi_{II} / 3$

La flèche est ensuite calculée, conformément à la théorie des poutres, par intégration de la loi moment-courbure.

1.5. Applications

Le développement des BFUP marque une nouvelle étape dans l'histoire des bétons. Ce matériau permet d'explorer de nouvelles façons de construire en vue d'alléger la structure grâce à ses propriétés exceptionnelles aussi bien en termes de performances mécaniques que de durabilité. Par rapport aux avantages que peuvent offrir les BFUP, leur utilisation réside à l'heure actuelle, en raison de leur coût de fabrication élevé, en quelques ouvrages exceptionnels. C'est aussi pour cette raison que les BFUP ne peuvent pas être considérés comme le matériau alternatif au béton armé. Néanmoins, l'utilisation de BFUP est pertinente dans le cas des ouvrages légers et durables ou dans le cas des ouvrages aux formes recherchées, architectoniques (courbes, résilles, etc.) qu'il est impossible de confectionner en béton armé. L'utilisation de BFUP se résume dans les types d'applications suivants :

- Passerelles
- Ponts routiers
- Eléments de toiture (couverture)
- Renforcement d'ouvrage
- Joint-fill avec Ductal[®]

Nous présentons dans cette partie les applications remarquables en BFUP jusqu'à aujourd'hui. Dans un premier temps, un récapitulatif non exhaustif des grands ouvrages en BFUP réalisés depuis 1997 est présenté dans le Tableau 1 - 20.

Tableau 1 - 20 : Ouvrages en BFUP depuis 1997

Année	Ouvrage	Produit	Localité	Eléments en BFUP
1997	Passerelle à Sherbrooke	Ductal®	Rivière Magog, Sherbrooke, Québec	Structure en treillis avec précontrainte extérieure
1998	Centrales nucléaires de Cattenom et de Civaux		France	Poutres précontraintes
2001	Pont Bourg-lès-Valence	BSI®	France	5 poutres précontraintes à 2 âmes par portée
2002	Passerelle de Seonyu	Ductal®	Séoul, Corée du Sud	Arc à section ouverte (pi) précontrainte
2002	Passerelle Sakata Mirai	Ductal®	Japon	Caisson précontraint à hauteur variable
2004	Passerelle Yokemuri	Ductal®	Yamagata, Japon	-
2004	Passerelle de Papatoetoe	Ductal®	Auckland, Nouvelle Zélande	-
2004	Pont de Shepherds Creek	Ductal®	Australie	10 poutres en précontraint avec dalle en BO
2005	Couverture de la gare de péage	BSI®	Millau, France	53 voussoirs précontraints
2005	Pont de Saint Pierre la Cour	Ductal®	France	10 Poutres en I (précontraint) avec dalle en BO
2006	Passage inférieur de l'autoroute A51	BCV®	France	Caisson de 1,60m de hauteur précontraint
2007	Passerelle de Glenmore/Legsby	Ductal®	Calgary, Canada	Poutre centrale en T de 33,6m (précontraint)
2007	Pont Pinel	BSI®	France	Poutres en ITE® précontraintes (ou poutres en I à talon élargi)
2008	Passerelle du pont du Diable	Ductal®	France	Poutres précontraintes
2008	Pont de Cat Point Creek	Ductal®	Virginie, Etats-Unis	5 poutres précontraintes en T de 24,3 m
2008	Pont de Jakway park	Ductal®	Iowa, Etats-Unis	3 poutres précontraintes en PI
2008	Passerelle de Sanderling Drive	Ductal®	Calgary, Canada	Poutre maitresse précontrainte en T de 33,5 m
2008	Pont Hawk Lake	Ductal®	Ontario, Canada	12 poutres caissons de 27,2 m de long
2009	Pont Buller Creek	Ductal®	Ontario, Canada	10 poutres caissons de 27,8 m de long
2010	Chaussée Noden	Ductal®	Ontario, Canada	Dalles en bétons préfabriquées
2012	Pont Beaver Creek	Ductal®	Ontario, Canada	Poutres caissons de 10 à 17 m de long
2012	Ponts Hawkeye Creek	Ductal®	Ontario, Canada	Poutres caissons de 5 à 11 m de long
2013	MUCEM	Ductal®	Marseille, France	Couverture en résille, poutres, poteaux arboressantes précontraints, passerelles (précontraint)
2014	Stade Jean Bouin	Ductal®	Paris, France	Couverture en résille

Sur la base des applications citées, nous pouvons distinguer différents domaines d'application possibles de BFUP :

➤ Passerelles pour piétons

Les passerelles pour piétons sont des applications majeures des BFUP. Ce sont des ouvrages qui nécessitent une structure porteuse légère, une durabilité importante, et dont l'esthétique est souvent travaillée, puisque fréquemment localisés en zone urbaine. Combinés de la précontrainte, le BFUP offre la possibilité de réaliser l'ouvrage en une seule travée de longue portée comme c'est ainsi le cas des passerelles citées dans le Tableau 1 - 20. Les avantages comparés à la solution traditionnelle, béton armé ou béton précontraint avec béton ordinaire, sont le gain de poids, de temps, de durabilité et la facilité de construction grâce à la préfabrication des éléments.

➤ Ponts routiers

Outre des applications de type passerelle, les BFUP sont également utilisés pour les réalisations des ponts routiers en France (Resplendino et Bouteille, 2006), au Canada (Braike et al., 2006), en Australie (Cavill et Chirgwin, 2004), et aux Etats-Unis (Naaman et Chandransu, 2004), (Graybeal et Hartmann, 2005) essentiellement. Les ouvrages de type ponts routiers cités dans le Tableau 1 - 20 montrent que le BFUP peut être utilisé avec la précontrainte soit pour la fabrication des poutres de sections affinées de différentes formes, en T ou en I, soit pour l'ensemble poutre et dalle comme les caissons ou la section en Pi.

➤ Eléments de toiture en BFUP

La réalisation des couvertures en BFUP présente les avantages dans la liberté du choix de forme, dans l'économie de temps de construction, et dans la durabilité des éléments. Les ouvrages les plus connus en France sont les couvertures de la barrière de péage à Millau, la toiture en résille du Musée des Civilisations de L'Europe et de la Méditerranée (MuCEM) à Marseille, la toiture du stade Jean Bouin à Paris (Resplendino, 2004).

➤ Renforcement avec du BFUP

Les BFUP peuvent également être utilisés pour renforcer les ouvrages en béton armé existants, ce qui permet de réduire fortement les impacts économiques et écologiques par rapport à la solution de destruction et de reconstruction (Habert et al., 2013). Le principe de ce renforcement consiste à ajouter une couche mince de BFUP (de 25 à 75 mm) sur une dalle de

béton armé (dalle de pont) pour améliorer les performances mécaniques et durabilité de cette dernière (Denarié et al., 2005). Ces études ont ainsi montré que la couche BFUP augmente la tenue mécanique de la dalle vis-à-vis de la flexion, de l'effort tranchant, du poinçonnement, et de la fatigue de ces dalles. Ce type d'application fait l'objet de nombreux travaux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Spasojevic et al., 2008), (Oesterlee, 2010), (Bastien-Masse et al., 2013). De nombreux chantiers en Suisse, listés dans le Tableau 1 - 21, ont validé ces études.

Tableau 1 - 21 : Réalisation de renforcement avec du BFUP

Année	Ouvrages	Localisation
2004	Pont sur la Morge	Sion, Suisse
2007	Dalle de roulement d'une caserne de pompier	Genève, Suisse
2008	Pont de Dalvazza	Luzein, Suisse
2011	Pont des Vernettes	Montpreveyres, Suisse
2013	Pont sur le Val Tschiel	Donat, Suisse

➤ Pont mixte à dalles nervurées en BFUP

La solution de pont mixte à dalles nervurées a été proposée par (Toutlemonde et al., 2005), (Tavakoli et al., 2009) dans le cadre du projet national Mikti. Il s'agit de trouver une solution alternative aux dalles orthotropes métalliques pour les ponts en acier de grande portée. La solution retenue consiste à réaliser une dalle nervurée dans les deux directions avec un espacement de 0,6 m, cette dalle étant portée par les poutres principales. Les avantages de cette solution sont le gain de poids (-50%) par rapport à la solution classique avec dalle en béton armé, une meilleure durabilité, et une rapidité de mise en œuvre sur chantier grâce à la préfabrication de ces dalles qui limite les arrêts de trafic.

➤ Joint-fill avec du BFUP (Ductal®)

Les BFUP offrent une excellente alternative pour le clavetage des éléments de ponts préfabriqués. Ce type d'application, très courant au Canada et aux Etats-Unis, permet d'assurer efficacement la continuité mécanique entre les éléments tout en offrant de meilleures résistances et tenues dans le temps par rapport aux bétons classiques. Cette technique, dont la première application date de 2004 consistait à assurer la continuité des dalles préfabriquées d'un pont routier à Rainy Lake (Ontario). Elle ne nécessite pas de coffrage de la zone de clavetage, et, de plus, la quantité d'armature de jonction est fortement réduite (Graybeal et Hartmann, 2005). Suite à cette expérience réussie, les Ministères des

Transports au Canada et aux États-Unis ont adopté en 2006 cette solution pour la réalisation des ponts préfabriqués.

L'ensemble des ouvrages cités montre une diversité d'applications en BFUP grâce à certaines de leurs propriétés qui rendent leur utilisation du point de vue technique et économique pertinente, voire indispensable par rapport à des solutions plus conventionnelles. Il est évident que les BFUP présentent un coût de production élevé, lié à aux grandes quantités de matériaux de base coûteux. Pour cette raison, il est indispensable de réaliser une étude d'optimisation pour garantir un gain de coût réel par rapport à d'autres matériaux et/ou techniques. La conception et la réalisation de structure avec ce nouveau matériau présentent de nombreux avantages, mais nécessitent des réflexions vis-à-vis des aspects suivants que l'on pourrait encore améliorer et dont certains sont évidemment propres à la préfabrication qui nous intéresse dans le cadre du projet :

- Optimisation du dimensionnement visant à réduire les épaisseurs des éléments et donc les volumes de matériaux, qui permet, en outre, d'augmenter le nombre de pièces transportées et de limiter le bilan CO₂ lié au transport.
- Absence ou forte diminution de la quantité d'armatures, ce qui confère une plus grande liberté de forme.
- Durabilité accrue qui minimise les frais de maintenance et améliore la durée de vie de l'ouvrage.
- Connectivité avec l'ouvrage existant (en acier ou en béton armé).
- Avantage de la préfabrication (gain de temps de construction).

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 pouzzolaniques, 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 et une aptitude autoplaçante. 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 le métakaolin permet d'obtenir des performances assez proches de celles avec fumée de silice, présente l'avantage d'être moins couteux et plus disponible que la fumée de silice et dès lors peut représenter une solution pour réduire le coût de la matière première des BFUP.

Il est possible de fabriquer un BFUP avec un malaxeur pour bétons ordinaires à volume réduit, environ la moitié de la capacité maximale à l'échelle industrielle. Dans le cas d'un malaxeur conventionnel pour bétons ordinaires, le temps de malaxage est de 18 à 20 minutes.

A l'état frais, les BFUP sont généralement autoplaçants et présentent un caractère thixotropique qui peut entraîner une interface de type reprise de bétonnage en cas de délai excessif entre coulage successif de couches de matériaux. Le caractère thixotropique des BFUP est lié au volume de pâte important et au faible rapport E/C.

A l'état durci, les BFUP présentent une résistance caractéristique à la compression généralement supérieure à 150 MPa, pouvant aller jusqu'à 250 MPa. Le traitement thermique de type II à hautes températures, 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. Le dosage minimal recommandé est de 2% volumique permettant de garantir la non-fragilité du matériau (PR NF P18-470) et entre 2 et 2,5% en terme de compromis performances mécaniques-coût. L'angle d'inclinaison des fibres dans la matrice cimentaire joue aussi un rôle important sur le comportement post-fissuration. La synthèse sur le comportement différé des BFUP a montré que les déformations de retrait des BFUP se réduit essentiellement au retrait endogène, en raison du rapport E/C très faible. La valeur limite de retrait total des BFUP est de 700 $\mu\text{m/m}$ dont une valeur de 550 $\mu\text{m/m}$ pour la part endogène (AFGC, 2013). Le retrait de dessiccation des BFUP est faible contrairement au retrait endogène, avec une valeur de 150 $\mu\text{m/m}$ recommandée par (AFGC, 2013). Le coefficient de fluage est compris entre 0,8 et 1 pour les BFUP sans traitement thermique. Lorsqu'un BFUP est soumis à un traitement thermique à 90°C, le retrait et le fluage sont fortement réduits. Le retrait devient nul, et le coefficient de fluage tendrait vers 0,2 (AFGC, 2013).

Les durabilités des BFUP sont considérées comme potentiellement très élevées par rapport aux bétons classiques. Les propriétés de transferts, à savoir la porosité accessible à l'eau, le coefficient de perméabilité au gaz, et le coefficient de diffusion sont très faibles. L'évaluation des propriétés de transfert sous sollicitations mécaniques ont montré que les BFUP conservent une durabilité élevée grâce à la capacité de cicatrisation des microfissures suite à des réactions d'hydratation du ciment anhydre restant. Les retours d'expériences sur de nombreux chantiers démontrent un maintien des performances de durabilité de ce matériau dans le temps, même dans des conditions environnementales sévères (milieu marin, aéroréfrigérant de centrale nucléaire...).

En ce qui concerne l'aspect réglementaire, les prénormes spécifiques BFUP (PR NF P18-470) et (PR NF P18-710) sont en phase de finalisation de rédaction et devraient voir le jour en 2016. La présentation des points essentiels concernant l'aspect réglementaire permet d'avoir un aperçu allant du matériau avec les classifications des BFUP vis-à-vis du comportement en compression et en traction (PR NF P18-470) jusqu'à la conception des structures en BFUP (PR NF P18-710).

Enfin, la synthèse sur les applications des BFUP montre que l'utilisation de BFUP se résume à l'heure actuelle à quelques types d'applications tels que les passerelles, les ponts routiers, les éléments de toiture, le renforcement d'ouvrage et le joint-fill (avec du Ductal®). Malgré le coût de production élevé des BFUP, l'utilisation des BFUP à la place du béton armé

notamment peut être privilégiée, voire indispensable, dans certains ouvrages, grâce à leurs meilleures propriétés mécaniques et durabilité. Il est donc intéressant de réaliser avant la phase conception, une étude d'optimisation pour garantir un gain économique réel par rapport à d'autres matériaux et/ou techniques.

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 le métakaolin en substitution totale de la fumée de silice 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. Cette tâche est présentée dans le chapitre 2. Dans un deuxième temps, une étude approfondie à l'état frais et à l'état durci des BFUP formulés sera réalisée. La caractérisation à l'état frais va permettre de compléter les connaissances en cette matière sur les BFUP, en particulier la thixotropie vis-à-vis du problème de reprise de bétonnage. Elle contribuera également à optimiser le processus de production jusqu'au bétonnage des éléments. La caractérisation à l'état durci va permettre de classer les BFUP de façon réglementaire conformément la prénorme (PR NF P18-470) vis-à-vis des performances mécaniques ainsi que de la durabilité. Cette caractérisation permet aussi d'étudier l'influence des paramètres de formulation sur leur comportement à l'état durci.

Les travaux réalisés doivent permettre de réaliser une application en BFUP, avec la rédaction de la note de dimensionnement conforme à la prénorme calculs des structures en BFUP (PR NF P18-710).

CHAPITRE 2 : MISE AU POINT DES FORMULATIONS

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'optimisation de formulations de BFUP à faible coût de production. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les BFUP se distinguent des bétons classiques par leur résistance élevée en compression, 150 MPa, et en traction directe, 6 MPa, d'après la prénorme BFUP matériaux (PR NF P18-470). Leur matrice cimentaire se distingue par un fort dosage en liant, ciment et addition, par la suppression de gros granulats pour améliorer l'homogénéité du mélange, par l'utilisation de superplastifiant haut réducteur d'eau, et par l'emploi systématique de fibres qui assurent la ductilité du matériau. Un traitement thermique (TT), qui accélère le durcissement (TT type I) ou qui augmente la résistance en compression (TT type II) est très souvent appliqué.

Le BFUP offre de nouvelles possibilités dans la conception d'éléments de structure ou dans la réparation d'ouvrages existants grâce à ses propriétés mécaniques et de durabilité remarquables. Cependant, le coût élevé, lié à la matière première, associé à l'absence de normes matériaux et de dimensionnement, tout du moins au début de ce projet de recherche, freinent à l'heure actuelle leur utilisation dans de nouveaux projets de construction. Ce coût est dû à l'utilisation de matériaux onéreux en grande quantité tels que le ciment, la fumée de silice, les fibres métalliques et à l'énergie nécessaire à l'application du TT. De ce fait, la recherche de formulations de BFUP de moindre coût de production et de meilleur bilan écologique, notamment en utilisant le métakaolin à la place de la fumée de silice et sans recours au TT, semble pertinente.

Les applications visées par l'entreprise étant structurales, les formulations mises au point doivent prétendre à la dénomination de BFUP-S, de classe de résistance en compression supérieure ou égale à 150 MPa, de type M à base de fibres métalliques, pour être couverts par la future norme de calculs des structures en BFUP (PR NF P18-710).

Ce chapitre est divisé en trois parties. Dans la première, nous allons présenter l'étude de mise au point de formulations, comprenant la sélection des matériaux utilisés. Une fois les formulations les plus prometteuses identifiées, l'étude de l'influence du type de malaxeur sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci sera présentée. Cette étape clé, qui constitue la deuxième partie, permettra de valider la robustesse des BFUP formulés au laboratoire en conditions de production industrielle dans la centrale de préfabrication de l'entreprise Lagarrigue. Dans la dernière partie, nous présenterons l'influence des conditions de

conservation sur les propriétés mécaniques afin de proposer des recommandations pour assurer la meilleure reproductibilité possible de ces matériaux en usine.

2.1. Formulation des BFUP

L'objectif est de mettre au point des BFUP-S, de type M à base de fibres métalliques de classe de résistance supérieure ou égale à 150 MPa, qui sont les seuls couverts par la prénorme calcul BFUP (PR NF P18-710). Dans l'optique de réduire le coût et le bilan carbone, liés à la matière première des BFUP formulés, nous avons établi les critères de formulation suivants :

- utilisation d'un sable local ;
- utilisation du métakaolin en substitution totale de la fumée de silice ;
- absence de traitement thermique ;
- optimisation de la teneur en ciment et en fibres ;
- utilisation exclusive de fibres métalliques pour obtenir un BFUP-M conformément aux normes BFUP, matériaux (PR NF P18-470) et calcul (PR NF P18-710) ;
- formulations autoplaçantes sans vibration.

L'utilisation d'un sable produit par une carrière proche de l'usine (distance inférieure à 100 km) s'impose naturellement afin de réduire le coût de transport et le bilan carbone associé. L'incorporation de métakaolin en substitution totale de la fumée de silice, systématiquement présente dans les BFUP commerciaux, mais onéreuse de par sa production et son conditionnement, offre aussi une solution plus économique et écologique. Dans la même logique, le choix a été fait de ne pas appliquer de traitement thermique. En effet, la mise en œuvre du dispositif de TT nécessite un investissement qui se répercute sur le prix du produit final, et son application augmente fortement la consommation d'énergie. Enfin, l'optimisation de la teneur en ciment et en fibres, qui consiste à déterminer les quantités les plus faibles possibles tout en maintenant les performances requises, devrait contribuer également à la maîtrise du coût des matières premières. L'aptitude autoplaçante est visée pour plusieurs raisons. L'absence de vibration procure des gains énergétiques, de temps et encore de coût. Par rapport aux fibres, cela permet d'éviter les effets de cheminée, de limiter leur ségrégation préjudiciable au comportement mécanique notamment en traction.

Les BFUP formulés doivent respecter les critères de formulation cités ci-dessus et doivent également répondre aux exigences à l'état frais et à l'état durci. A l'état frais, les BFUP

doivent être autoplaçants pour faciliter et assurer une bonne mise en œuvre. A l'état durci, les BFUP doivent satisfaire aux recommandations de (AFGC, 2002, 2013) et de la prénorme (PR NF P18-470) en termes de performances mécaniques et de durabilité.

2.1.1. Sélection des matières premières

Cette partie décrit le choix des constituants utilisés pour les formulations de BFUP de notre projet. Il est rappelé ici que les matériaux locaux tels que les sables sont privilégiés afin de réduire le coût de transport. Une addition pouzzolanique moins coûteuse, à savoir le métakaolin, est aussi utilisée en substitution de la fumée de silice.

2.1.1.1. Ciment

Parmi les ciments disponibles et utilisés par l'entreprise, nous avons choisi le CEM I 52,5 N PM ES CP2 provenant de l'usine Lafarge Le Teil dont les caractéristiques chimiques et physiques sont présentées dans les Tableau 2 – 1. Ce ciment est retenu dans cette étude pour ses performances mécaniques (appellation CEM I 52,5) et sa faible teneur en C_3A ($< 5\%$). qui permet de diminuer les demandes en eau et en adjuvant, à même ouvrabilité du BFUP (aptitude autoplaçante).

2.1.1.2. Additions

Le cahier des charges établi précédemment conduit à l'utilisation de métakaolin comme addition pouzzolanique. Comme vu dans l'état de l'art du chapitre 1, l'incorporation du métakaolin dans des formulations de bétons ultra performants permet d'atteindre des performances mécaniques quasiment équivalentes à celles à base de fumée de silice (Tafraoui et al., 2009). Dans ce projet, le métakaolin a été utilisé en remplacement total de la fumée de silice dans le but de réduire les coûts de production ainsi que les impacts environnementaux. Nous avons retenu le métakaolin de couleur rose de Fumel, obtenu par calcination flash et produit par l'entreprise Argeco[®]. Ses caractéristiques chimiques et physiques sont décrites dans le Tableau 2 – 1.

Afin de mener une étude comparative permettant d'étudier la pouzzolanité et l'efficacité du métakaolin, et d'identifier ainsi l'effet du type d'additions, nous avons également utilisé une fumée de silice utilisée habituellement dans les BFUP et qui fera office de formulation de référence. Cette fumée de silice, dont les caractéristiques chimiques et physiques sont

détaillées dans le Tableau 2 – 1, provient de chez Condensil[®]. Il s'agit de la fumée de silice de type FS DM 95, densifiée mécaniquement.

2.1.1.3. Granulats

De nombreuses études (Richard et Cheyrezy, 1995), (De Larrard et Sedran, 1994) préconisent un sable fin ($D_{\max} < 600\mu\text{m}$) siliceux pour la confection des BFUP. Pour respecter le critère d'utilisation de matériaux locaux proches de l'usine de préfabrication Lagarrigue, le choix s'est porté sur un sable roulé et lavé, de dimension maximale de 2 mm provenant de la carrière Decremps (Cahors) située à 100 km environ de l'usine de préfabrication Lagarrigue. Il a été choisi pour sa haute teneur en silice (95%) induisant une dureté élevée, et la forme ronde de ses grains qui favorise l'écoulement du béton, malgré un diamètre maximal plus élevé que celui indiqué dans les préconisations. Une pré-étude comparative, non présentée dans ce mémoire, a montré que, parmi les autres sables disponibles dans la région, celui-ci procurait les meilleures performances. Les caractéristiques chimiques et physiques du sable sont présentées dans le Tableau 2 – 1.

2.1.1.4. Adjuvant

Le superplastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération utilisé est à base de polycarboxylate modifié. Il est conforme à la norme (NF EN 934-2, 2012), et est produit par la société Chryso[®]. Il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage sans perdre de maniabilité. Pour pouvoir réduire le rapport Eau/Liant à des valeurs proches de 0,2, couramment utilisées pour les BFUP, une quantité importante de superplastifiant est nécessaire afin de garantir une bonne ouvrabilité. La teneur en adjuvant est adaptée pour chaque formulation afin de respecter les critères de maniabilité tout en évitant les problèmes de retard de prise souvent inhérents à un excès du dosage.

2.1.1.5. Fibres métalliques

Le choix de fibres se base sur deux critères liés à leur nature et à leur géométrie. Etant donné que les applications envisagées par l'entreprise Lagarrigue sont structurales, les BFUP doivent être de type BFUP-M, à base de fibres métalliques à haute résistance en traction et de module d'élasticité élevé, afin d'obtenir le comportement désiré du BFUP en traction, comme préconisé par les prénormes matériaux (PR NF P18-470) et calcul (PR NF P18-710). Le deuxième critère concerne la maniabilité du béton à l'état frais, ce qui tend à privilégier des fibres plutôt courtes et de rapport longueur/diamètre faible pour éviter les phénomènes de

frottement et les formations de pelotes. Les fibres sélectionnées sont droites, en acier, de 13 mm de longueur, et de 200 µm de diamètre. Elles sont fournies par la société Bekaert®. Ces fibres possèdent une résistance élevée en traction de 3000 MPa et un module d'élasticité de 200 GPa.

2.1.2. Propriétés physico-chimiques des constituants

Le Tableau 2 – 1 détaille la composition chimique et les propriétés physiques des différents constituants utilisés dans les formulations de BFUP.

Tableau 2 – 1 : Propriétés chimiques déterminées par spectrométrie et par chromatographie ionique, et propriétés physiques issues des fiches techniques des constituants (Annexe 1)

		CEM I	Métakaolin	Fumée de silice	Sable 0/2
Composition chimique (% massique)	CaO	64,50	1,63	0,80	0,12
	SiO ₂	22,50	65,90	96,50	95
	Al ₂ O ₃	3,26	25,10	0,21	2,24
	Fe ₂ O ₃	2,33	4,26	0,16	0,15
	MgO	1,00	0,37	0,29	0,02
	MnO	0,038	0,007	0,02	-
	Na ₂ O	0,11	0,071	0,17	0,12
	K ₂ O	0,23	0,41	0,52	1,44
	SO ₃	2,37	-	0,24	-
	TiO ₂	0,13	1,20	<0,05	0,06
	P ₂ O ₅	0,07	0,059	0,09	-
Perte au feu		1,37	2,63	2,74	0,31
Propriétés physiques	Dimension moyenne D ₅₀ (µm)	15	28	20	-
	Surface spécifique BET (m ² /g)	0,36	16	23	-
	Absorption (%)	-	18	-	0,9
	Teneur en fine (passant à 63 µm en %)	-	74,5	-	0
	Densité réelle	3,15	2,50	2,24	2,75
	Indice d'activité	-	1	≥1,05	-

La composition chimique des constituants a été déterminée par spectrométrie à torche plasma (ICP) et par chromatographie ionique pour les sulfates.

- Le métakaolin est formé essentiellement d'oxyde de silicium SiO₂ et d'oxyde d'aluminium Al₂O₃. Cette teneur élevée en silice, de 65% environ, est due en partie à la présence de quartz (48%) qui pourrait réagir notamment lors d'un traitement thermique. La silice restante est couplée avec l'alumine dans le métakaolin et sera à l'origine de sa pouzzolanicité puisqu'il constitue un élément indispensable pour former des C-S-H secondaires (et des C-A-S-H) à partir de la consommation de la portlandite.

- La fumée de silice présente une teneur en silice de 96% environ, à l'origine de sa haute pouzzolanité. C'est pourquoi les BFUP incorporent très souvent cette ultrafine afin d'obtenir des performances mécaniques élevées.
- Le sable se caractérise par une forte teneur en SiO₂, ce qui va dans le sens des préconisations des précédentes études présentées dans le chapitre 1 pour le choix du sable.

Les propriétés physiques présentées sont celles données par les fiches techniques des produits.

- Le métakaolin présente un diamètre moyen D₅₀ de 28 µm supérieur à celui du ciment. En revanche, sa surface spécifique de 16m²/g est bien supérieure à celle du ciment. Ceci est dû à la morphologie du métakaolin de type plaquettes. Le métakaolin a un indice d'activité de 1, et un coefficient d'absorption d'eau élevé de 18%. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons particulièrement à cette forte capacité d'absorption d'eau.
- La fumée de silice présente une finesse de 23 m²/g, supérieure à celle du ciment et du métakaolin. Son indice d'activité est supérieur à 1,05 selon sa fiche technique. Enfin, le coefficient d'absorption d'eau du sable est relativement faible, 0,9%, mais est assez classique pour un tel matériau.

La granulométrie des fines, ciment, métakaolin et fumée de silice, a été déterminée au laboratoire par granulométrie laser par voie humide. Il est important de préciser que le liquide utilisé pour le ciment est de l'éthanol afin d'éviter toutes réactions d'hydratation du ciment pendant l'essai. Pour le métakaolin et la fumée de silice, l'eau a été utilisée puisqu'elle ne réagit pas avec ces additions. Les courbes granulométriques des fines et du sable (obtenue par tamisage) sont présentées sur la Figure 2 – 1.

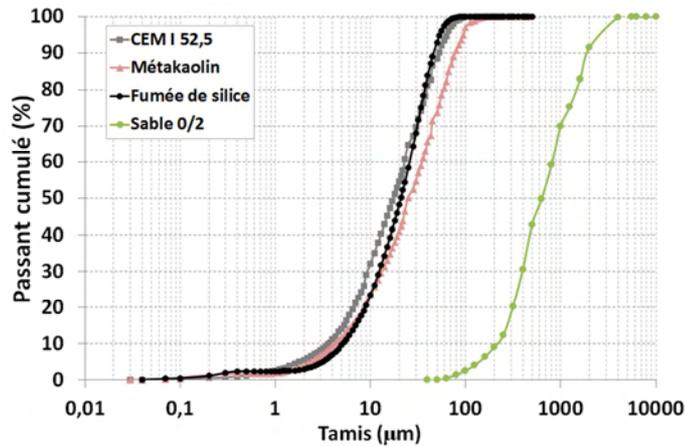


Figure 2 – 1 : Courbes granulométriques des fines et du sable

D'après ces courbes, nous pouvons constater que le métakaolin possède une distribution granulométrique comprise entre 0,04 et 100 μm avec un diamètre médian D_{50} de 28 μm . Quant au ciment, son étendue granulaire se situe entre 0,04 et 60 μm avec un diamètre médian de 15 μm . Ces courbes confirment que le métakaolin est légèrement plus grossier que le ciment. Ceci est dû à la teneur élevée en quartz de ce métakaolin, 48% d'après (San Nicolas, 2011), qui constitue la fraction grossière de ce dernier, et au mode de calcination flash qui n'utilise pas de broyage après calcination.

Concernant la fumée de silice, sa distribution granulaire se situe entre 0,04 et 60 μm , avec un diamètre moyen D_{50} de 20 μm environ. La valeur du diamètre moyen (D_{50}) obtenue par la granulométrie laser est supérieure à celle observée à la microscopie électronique, qui est de 1 μm (Leung, 2015). Cette différence vient de la difficulté à disperser les grains de fumée de silice qui tendent à s'agglomérer entre eux compte tenu de leur charge surfacique. En général, elle est plus fine que le ciment et le métakaolin, alors qu'ici elle semble assez proche du ciment.

Le sable utilisé présente une distribution granulaire comprise entre 0,063 et 2 mm.

2.1.3. Rapport Eau/Liant (E/L)

La teneur en eau dans le béton est exprimée en rapport massique entre la quantité d'eau efficace E (également notée E_{eff}) et la quantité de ciment C , ou de liant L en présence d'additions. Pour atteindre les performances mécaniques de la classe BFUP, il est nécessaire de réduire le rapport E/L qui conduit à une faible porosité de la pâte de ciment hydraté. Il est mentionné dans la revue bibliographique que le rapport E/L des BFUP est généralement

proche, voire inférieur à 0,2, ce qui est évidemment extrêmement faible par rapport aux bétons ordinaires. 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 hydraté et joue le rôle d'un filler. Ces anhydres résiduels procurent également une capacité d'auto-cicatrisation.

Durant notre étude de mise au point des formulations de BFUP, la teneur en eau a été déterminée de manière à satisfaire à la fois les critères de performances mécaniques et d'ouvrabilité.

2.1.4. Mise au point des formulations

Cette partie présente la mise au point des formulations originales de BFUP à base de métakaolin. Lors de l'étude bibliographique, nous avons vu qu'il n'existe pas de méthode générale de formulation pour les BFUP, la méthode de (Dreux et Festa, 1998) n'étant pas par exemple applicable à ces matériaux en raison de l'étendue granulaire très rapprochée. La mise au point de formulation de BFUP fait cependant appel à de nombreux principes cités par (Richard et Cheyrezy, 1995) et (De Larrard et Sedran, 1994).

Dans notre cas, la démarche adoptée consiste dans un premier temps à valider le choix des matériaux, sable et métakaolin par rapport aux exigences de performances mécaniques, à partir d'une première formulation issue de l'étude bibliographique. Ce travail a ensuite été suivi d'une étude d'optimisation visant à modifier la formulation de base afin de réduire la quantité de liant, qui représente les matériaux les plus coûteux (avec les fibres), tout en maintenant les performances mécaniques et l'ouvrabilité. Nous rappelons que les BFUP doivent satisfaire à la classification BFUP-S, de résistance caractéristique en compression minimale de 150 MPa à 28 jours (PR NF P18-470), et que nous avons imposé le critère autoplaçant pour faciliter la mise en œuvre, limiter l'énergie en éliminant la vibration, et assurer une répartition homogène des fibres.

2.1.4.1. Travail préliminaire

Une étude préliminaire a été réalisée dans le but de valider le choix des matériaux pour la confection des BFUP. En se basant sur les travaux de (Tafraoui, 2009), nous avons testé une première composition proche de celle notée DUMKF dans son étude, établie avec les matériaux sélectionnés. Les valeurs des proportions massiques des constituants, de masse volumique (NF EN 12350-7, 2012) et d'étalement, mesurées au mini-cône, sont détaillées

dans le Tableau 2 – 2. Le mini cône utilisé s’inspire du cône d’Abrams (NF EN 12350-2, 2012) qui sert à qualifier la maniabilité des bétons. Ce choix a été fait en se basant sur les travaux de (Tafraoui, 2009) sachant que la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) n’était pas encore en projet de publication au moment des essais. Chacune des dimensions du mini cône correspondent à la moitié de celle correspondante du cône d’Abrams. La valeur de l’étalement correspond à la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton. Cet essai permet de surveiller aussi visuellement la ségrégation, notamment des fibres dans le cas d’un BFUP, et le ressuage du béton.

Tableau 2 – 2 : Composition massique du BFUP et étalement au mini cône

Quantité des constituants en kg pour 1m ³ de béton					
Ciment	Sable 0/2	Métakaolin	Fibres métalliques (% volumique)	Superplastifiant	Eau efficace
880	901	220	160 (2%)	53	200
Masse volumique : 2400 kg/m ³					
Rapport Eau efficace/Liant (E_{eff}/L) : 0,18					
Etalement au mini cône : 25 cm					

Dans cette composition, la quantité de métakaolin est de 25% de la masse de ciment, ce qui est supérieur à la teneur limite d’utilisation de 15% en masse de ciment de type CEM I de cette ultrafine d’après la norme (NF EN 206, 2014). Précisons que les BFUP ne sont pas concernés par cette norme. Les dosages en fibres métalliques et en superplastifiant sont respectivement fixés à 2% volumique (PR NF P18-710) et 6% en masse de ciment. La réduction du rapport E_{eff}/L à 0,18 justifie l’emploi d’une grande quantité de superplastifiant de 6% en masse de ciment par rapport aux bétons classiques (de 0,5% à 1,5% en masse de ciment). La teneur en superplastifiant utilisé dépasse la teneur limite de 5% en masse de ciment selon la norme (NF EN 934-2, 2012). Nous précisons que la teneur en eau du sable est préalablement déterminée avant le coulage, et que celle-ci est prise en compte lors du calcul de l’eau de gâchage.

Pour des raisons pratiques, durant cette étude préliminaire à multiples formulations, de faibles volumes de BFUP ont été confectionnés dans un malaxeur de mortier de 10 litres de capacité maximale. La procédure de malaxage est adaptée à partir des études de (Tafraoui, 2009), (Bonneau et Vernet, 1998) et de (Cazacliu et al., 2006) :

- introduction successive de la moitié de la quantité de sable, de la totalité du ciment, du métakaolin ou de la fumée de silice, et de l’autre moitié de sable ;
- pré-malaxage des matériaux pendant 2 minutes ;

- ajout de l'eau et du superplastifiant (le superplastifiant est mélangé avec l'eau) ;
- malaxage humide jusqu'à fluidification ;
- introduction des fibres, puis malaxage pendant 2 minutes.

Le temps total de malaxage est de 12 minutes environ. L'essai d'étalement au mini cône effectué après le malaxage est un indicateur rapide permettant d'évaluer l'ouvrabilité du béton. Une valeur d'étalement de 25 cm a été obtenue pour cette première composition, sans ségrégation de fibres. Le BFUP présente un caractère autoplaçant, par conséquent la confection des éprouvettes peut être réalisée sans vibration.

La détermination de la résistance en compression et en flexion a été réalisée sur les éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. Aucun traitement thermique n'a été appliqué. Les éprouvettes ont été conservées dans une salle humide à température et humidité contrôlées ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ HR) après leurs confections jusqu'à l'échéance d'essai. Les résultats sont présentés sur la Figure 2 – 2 avec la confrontation avec les valeurs obtenues par (Taфраoui, 2009). Ces valeurs de résistance présentées correspondent à la moyenne de 3 échantillons prismatiques pour la flexion et de 6 échantillons en compression. Les échantillons pour la compression sont les deux parties du prisme initial récupérées après rupture par flexion. Les essais effectués, pilotés en force suivant une vitesse de chargement de 0,5 kN/s en compression et de 0,05 kN/s en flexion, sont conformes à la norme (NF EN 196-1, 2006).

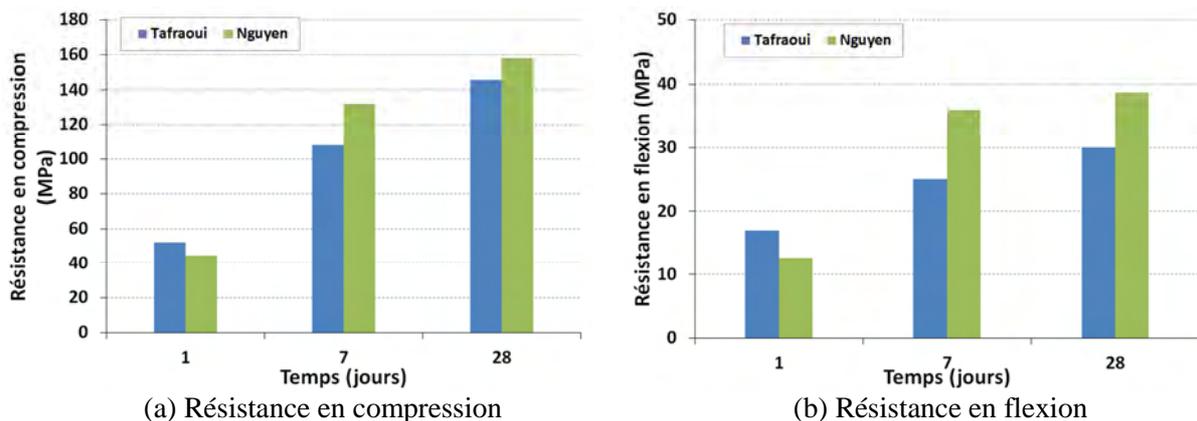


Figure 2 – 2 : Comparaison des résistances mécaniques avec les travaux de (Taфраoui, 2009)

Les résultats de résistances mécaniques obtenus durant cette étude préliminaire montrent que les matériaux sélectionnés pour la confection de BFUP donnent des performances mécaniques plus élevées que celles des matériaux de (Taфраoui, 2009) à partir de 7 jours. Les valeurs de 158 MPa et de 38 MPa respectivement en compression et en flexion obtenues à 28

jours, comparées aux 146 MPa et 30 MPa dans l'étude de (Tafraoui, 2009), représentent un gain de 7,5% en compression et de 21% en flexion à 28 jours. A 1 jour, les résistances de la présente étude sont plus faibles que celles de (Tafraoui, 2009). Ceci peut être dû à une quantité supérieure de superplastifiant utilisée dans notre étude provoquant ainsi un léger retard de prise.

Ces résultats permettent de valider le choix des matériaux pour la confection des BFUP. Ainsi, contrairement aux préconisations dans le choix de granulats indiquées dans l'étude bibliographique, l'utilisation d'un sable local plus grossier d'origine naturelle, et beaucoup moins onéreux, à la place du sable fin paraît tout à fait envisageable. L'incorporation du métakaolin en substitution totale de la fumée de silice dans la confection des BFUP donne aussi des résistances mécaniques prometteuses même en absence de traitement thermique. Ce premier résultat confirme les travaux de (Rougeau, 2004) et de (Tafraoui, 2009).

Par rapport à cette formulation de base, nous avons réalisé une étude exploratoire dans le but d'obtenir des formulations de BFUP ayant de meilleurs bilans économique et écologique. Pour cela, un bilan de coût lié aux matières premières a été établi pour identifier l'impact de chaque constituant. Il s'avère que les fibres métalliques, le ciment, et le superplastifiant sont les matériaux les plus coûteux. La teneur en fibres, fixée à 2% volumique dans la formule initiale, ne peut être abaissée car elle correspond à la limite basse préconisée par la prénorme (PR NF P18-470) afin de garantir la non-fragilité du matériau. Afin de réduire le coût, il faut donc limiter autant que possible la teneur en liant (ciment et métakaolin) et en adjuvant, tout en maintenant les performances mécaniques et l'aptitude autoplaçante. Pour cela, nous avons substitué une proportion de ciment dans la formulation de référence notée 880_2% par du sable, et/ou par du métakaolin.

La quantité de ciment est réduite par pas de 100 kg par rapport à la formulation de base. La proportion de métakaolin est figée à 25% en masse de ciment. Le rapport E/L est maintenu à 0,19 pour garantir des performances mécaniques élevées. La teneur en superplastifiant est ajustée afin de satisfaire les conditions d'ouvrabilité sachant que l'étalement au mini cône doit être au moins égal à 25 cm (Wille et al., 2012) pour satisfaire le critère autoplaçant. Le Tableau 2 – 3 regroupe les résultats d'étalement au mini cône et les résistances mécaniques obtenues sur éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm, avec en rouge les formulations non réalisables, c'est-à-dire pour laquelle la mise en œuvre des bétons ne peut se faire sans vibration.

Tableau 2 – 3 : Résultats à l'état frais et à l'état durci à 28 jours des formulations de bétons testés

	Formulations	MK/C	Étalement au mini cône (cm)	f_{cm} (MPa)	f_{fm} (MPa)
Référence	880_2%_0/2	0,25	25	162	41
(1)	780_2%_0/2	0,25	23	148	32
	680_2%_0/2	0,25	19	135	28
	580_2%_0/2	0,25	Non réalisable	-	-
(2)	780_2%_MK	0,37	18	143	31
	680_2%_MK	0,54	Non réalisable	-	-
(3)	780_0/2+MK	0,31	23	152	36
	680_0/2+MK	0,40	20	133	31

Notation :

- (1) Signifie que la quantité de ciment réduite est remplacée par du sable
- (2) Signifie que la quantité de ciment réduite est remplacée par du métakaolin
- (3) Signifie que la quantité de ciment réduite est remplacée par le mélange moitié sable, moitié métakaolin

Sur la base des résultats obtenus (Tableau 2 – 3), les observations suivantes peuvent être faites:

- Dans le cas (1) où la quantité de ciment est substituée par le sable, on constate une diminution acceptable de l'étalement (-8%) et des résistances mécaniques (-8,6% en compression et -21,9% en flexion) pour un remplacement de 100 kg, mais une forte diminution de l'étalement (-24%) et des résistances mécaniques (-18% en compression et -32% en flexion) lors d'une réduction de 200 kg de ciment. La chute des résistances peut être due à une diminution de la compacité du mélange par manque de fines. La diminution de l'étalement au mini cône, malgré l'ajustement de superplastifiant, peut être également attribuée aux effets couplés du plus faible volume de pâte et de l'augmentation des frottements intergranulaires. L'ouvrabilité de moindre qualité de ce mélange très visqueux pourrait également entraîner des bulles d'air assimilables à des macrodéfauts qui affecteraient les performances mécaniques, notamment la résistance en traction par flexion.
- Dans le cas (2) où une partie du ciment est remplacée par du métakaolin, une baisse significative de l'étalement (-20%) et des résistances mécaniques (-12% en compression et -24% en flexion), a été notée, et ce dès la réduction de 100 kg de

ciment. Ceci peut provenir du grand pouvoir d'absorption d'eau du métakaolin (18% selon la fiche technique) qui n'est pas pris en compte dans le calcul de l'eau efficace. En effet, le métakaolin se caractérisant par une grande surface spécifique avec une structure de type feuillets, il est probable qu'une partie de l'eau de gâchage soit piégée entre ces plaquettes et ne puisse pas participer à la fluidification du mélange, induisant ainsi une baisse de maniabilité lorsqu'il est utilisé à des dosages importants. L'impact négatif sur l'ouvrabilité affecterait dès lors les caractéristiques mécaniques.

- Dans le cas (3) où la quantité de ciment est remplacée par un mélange moitié sable, moitié métakaolin, nous avons noté une baisse de l'étalement (-20%) et des résistances mécaniques (-18% en compression et -24% en flexion) lors d'une réduction de 200 kg de ciment. Ces diminutions sont moins importantes que dans le premier cas, en raison de la teneur en fines supérieure.

Ces résultats montrent donc que :

- il est indispensable de prendre en compte l'absorption d'eau du métakaolin dans le calcul de l'eau efficace afin d'obtenir une bonne maniabilité ;
- il est également indispensable d'optimiser la compacité du mélange.

2.1.4.2. Etude d'optimisation

Nous avons observé dans l'étude préliminaire que le grand pouvoir d'absorption d'eau de métakaolin pouvait être à l'origine d'une réduction de maniabilité qui affecte les propriétés mécaniques. La norme dédiée aux bétons (NF 206-1, 2012) ne prend plus en compte le coefficient d'absorption d'eau des fines et ultrafines dans le calcul de l'eau totale. Dans notre cas, il semble nécessaire de prendre en considération l'eau absorbée par cette ultrafine afin de garantir une bonne fluidité du mélange et de limiter ainsi le piégeage de bulles d'air et la présence de macrodéfauts liés à une mauvaise mise en œuvre qui altéreraient le comportement mécanique du BFUP. Pour cela, nous avons effectué la mesure du coefficient d'absorption d'eau du métakaolin en se basant sur la méthode de (Mechling et al., 2003).

Outre la prise en compte de la demande en eau du métakaolin, il est indispensable d'augmenter la compacité du mélange afin d'atteindre les résistances mécaniques les plus élevées possibles. Plusieurs paramètres influencent la compacité. En ce qui concerne les granulats, l'utilisation de matériaux locaux définis dans le cahier des charges nous a amené à ne pas employer de sable fin correcteur de granulométrie. Par conséquent, nous avons mené

une étude destinée à améliorer la compacité du mélange en optimisant seulement le couple ciment-métakaolin, qui sont de granulométrie proche. La détermination du taux de substitution optimal du ciment par le métakaolin est basée sur la méthode développée par (Kwan et al., 2012), dite de « compacité humide ».

2.1.4.2.1. Prise en compte de l'absorption d'eau de métakaolin

Nous avons mesuré l'absorption d'eau du métakaolin au moyen d'un essai d'évaporométrie développé par (Mechling et al., 2003). La technique proposée consiste à suivre la variation de perte de masse d'un mince tapis granulaire imprégné d'eau, à savoir dans notre cas un mélange métakaolin + eau, soumis à une température de 40°C. Ce mélange est déposé dans un bac positionné horizontalement dans l'enceinte d'une étuve maintenue à la température modérée de 40°C±2°C. Le principe de l'essai repose sur le fait que l'eau externe aux grains ne s'évapore pas à la même vitesse que l'eau interne. En effet, le séchage par convection d'un corps poreux comporte, après une phase transitoire où le système se met en température, une phase à vitesse de séchage constante correspondant à l'eau externe, suivie d'une phase à vitesse décroissante correspondant à l'eau interne. Le changement de régime entre l'évaporation de l'eau externe et de l'eau interne aux grains permet de déterminer la teneur en eau critique correspondant à la quantité d'eau absorbée recherchée.

La Figure 2 – 3 décrit de manière schématique les trois phases présentées précédemment en terme d'évolution de la variation de teneur en eau e , et d'évolution de la variation du gradient d'évaporation de/dt au cours du temps.

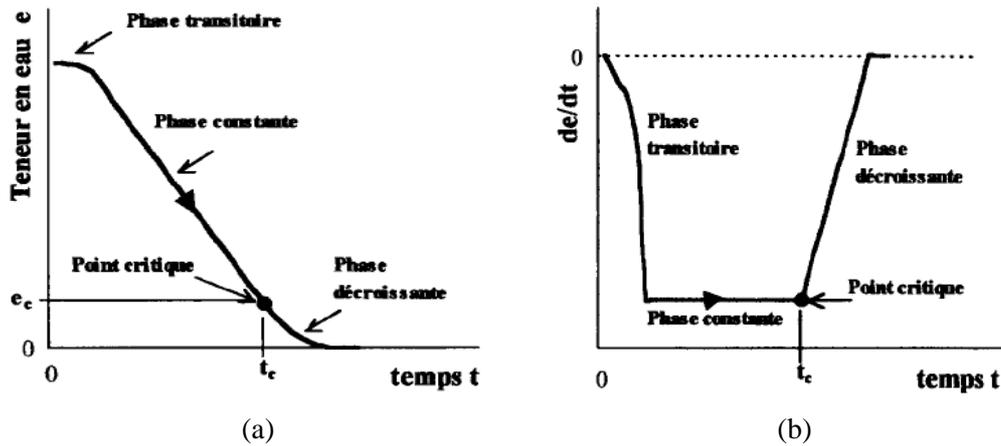


Figure 2 – 3 : Courbes de séchage d’un matériau poreux : variation de la teneur en eau e (a) et du gradient d’évaporation de/dt (b), en fonction du temps t

Cette décomposition suppose que toute l’eau présente entre les grains (eau externe) se diffuse vers la surface du tapis granulaire et s’évapore durant la phase à vitesse de séchage constante. L’eau interne s’évapore plus lentement pendant la phase à vitesse de séchage décroissante. La transition de l’une à l’autre passe par un point critique de séchage qui correspond à l’eau absorbée par le métakaolin. Ce point de transition entre les 2 dernières phases est facilement repérable en traçant le gradient d’évaporation en fonction du temps : le temps critique (t_c) est déterminé par le changement de pente entre la phase constante et la phase décroissante. Le temps critique détecté est ensuite reporté dans la courbe représentant la teneur en eau en fonction du temps pour déterminer la teneur en eau absorbée par la fine, le métakaolin en l’occurrence.

La Figure 2 – 4a représente la variation de la teneur en eau du métakaolin en fonction du temps et la Figure 2 – 4b représente le gradient d’évaporation d’eau du métakaolin en fonction du temps.

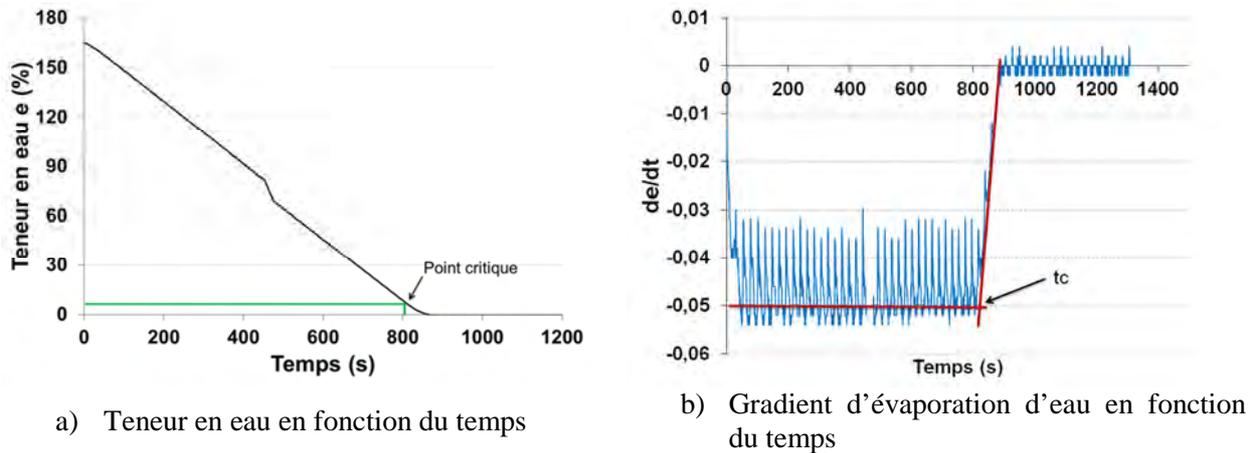


Figure 2 – 4 : Résultats de mesure d'absorption d'eau de métakaolin : (a) variation de la teneur en eau en fonction du temps ; (b) gradient d'évaporation d'eau en fonction du temps

Sur la base de ces résultats, la teneur en eau au point critique comme l'indique la Figure 2 – 4a, est de 8% correspondant à l'absorption d'eau de métakaolin. Si l'on compare avec la valeur de 18% indiquée dans la fiche technique du métakaolin, la valeur obtenue de 8% de la présente étude est plus faible. L'origine provient vraisemblablement des méthodes de mesure différentes utilisées. La valeur de 18% indiquée dans la fiche technique de métakaolin a été obtenue en utilisant la méthode de détermination de l'absorption d'eau des granulats selon la norme (NF EN 1097-6), qui n'est pas forcément adaptée pour les fines en raison des difficultés liées à la recherche de l'état imbibé de la surface sèche des grains les plus fins (Mechling et al., 2003). Ainsi, pour la suite de notre étude, nous allons utiliser la valeur d'absorption d'eau du métakaolin déterminée avec la méthode de (Mechling et al., 2003).

2.1.4.2.2. Optimisation du couple ciment/métakaolin par la méthode de compacité humide

L'objectif de cette étude est d'identifier le taux de substitution optimal d'une partie du ciment par une ultrafine, le métakaolin dans notre cas, pour obtenir la compacité la plus élevée possible du mélange. Nous nous sommes basés sur les travaux de (Kwan et al., 2012) dans le but de déterminer les proportions d'un mélange ciment + additions minérales présentant une compacité maximale en mesurant la compacité en suspension dans l'eau. Le principe de la méthode consiste, pour un mélange à proportions données de ciment et d'addition, à déterminer sa compacité à partir de l'évaluation de son volume des vides. Le volume minimal des vides identifié peut être assimilé à une quantité d'eau minimale (eau compacte) qui remplit les vides entre les solides.

La procédure de l'essai consiste à mélanger le ciment, le métakaolin, l'eau et le superplastifiant dans un malaxeur de mortier comme l'illustre la Figure 2 – 5 pour former une pâte de ciment dont on détermine la teneur des vides en mesurant sa masse volumique. La séquence de malaxage est la suivante :

- La totalité de l'eau avec la moitié du superplastifiant est mise dans le bol du malaxeur et homogénéisée rapidement (t_0) ;
- On ajoute immédiatement la moitié des particules solides (mélange homogène du ciment et du métakaolin) et on malaxe à petite vitesse pendant trois minutes (t_0+3mn) ;
- On rajoute ensuite en 4 étapes successives le reste de poudre avec à chaque ajout un temps de malaxage de 3 minutes à petite vitesse (t_0+15mn).

Cette procédure de malaxage par ajouts successifs permet d'éviter les phénomènes de floculation qui rendent difficiles le mouillage des particules fines. La masse volumique de la pâte est mesurée à l'aide de trois récipients dont les volumes sont connus. Le remplissage de la pâte dans les récipients se fait en quatre couches, chaque couche est suivie d'une vibration de 30s afin de limiter l'air emprisonné entre des granules de pâte. La masse volumique finale correspond à la moyenne de 3 valeurs afin de minimiser les erreurs dues à l'expérimentation.



Figure 2 – 5 : Malaxeur à mortier et récipients utilisés pour les mesures de la masse volumique de la pâte

Nous avons effectué les mesures de compacité humide pour différents rapports massiques MK/C, à savoir 0,20 ; 0,25 ; 0,30 ; et 0,35 afin d'investiguer l'effet de différentes proportions de ciment et de métakaolin sur la compacité. Pour chaque rapport MK/C, différents rapports

volumique Eau plus Superplastifiant sur Poudre (E+SP/P) sont testés de manière à évaluer l'évolution de la compacité en fonction de ce ratio. La teneur en superplastifiant est de 5% de la masse de Poudre (MK+C). Ainsi, pour chaque rapport E+SP/P, le ratio des vides, noté u , de la pâte cimentaire est calculé par l'intermédiaire de l'équation (2 – 1) :

$$u = \frac{V_{p\grave{a}te} - V_{solide}}{V_{solide}} \quad (2 - 1)$$

Où :

- $V_{solide} = \frac{M}{\rho_w u_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_\gamma R_\gamma}$ avec ρ_w la masse volumique de l'eau, ρ_α , ρ_β et ρ_γ les masses volumiques des constituants α , β , et γ et R_α , R_β , R_γ les ratios volumiques des constituants α , β , et γ par rapport au matériau cimentaire ;

- u_w est le ratio d'eau, donné par l'équation : $u_w = \frac{V_w}{V_{solide}}$ où V_w est le volume d'eau ;

- M et $V_{p\grave{a}te}$ sont respectivement la masse et le volume de la pâte.

La Figure 2 – 6 représente un exemple de résultat obtenu pour un rapport addition/ciment donné (A/C), où le ratio des vides (ou voids ratio sur la figure) est tracé en fonction du rapport Eau/Poudre (E/P) (ou W/CM sur cette figure). Il est important de noter que l'adjuvant n'a pas été utilisé dans l'étude de (Kwan et al., 2012). Il est conseillé de commencer l'essai avec un rapport E/P égal à 1, et de réduire successivement ce rapport jusqu'à ce que la concentration solide atteigne une valeur maximale puis diminue.

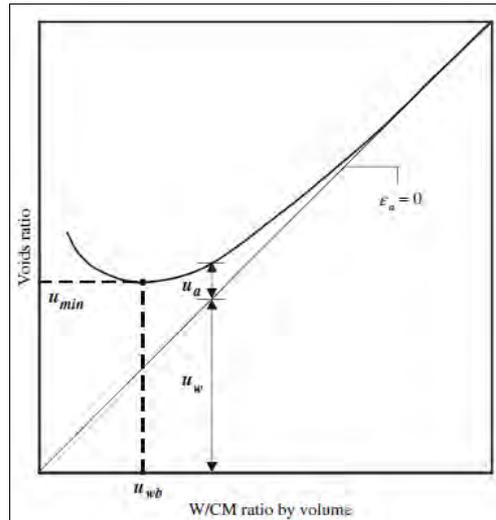


Figure 2 – 6 : Représentation du ratio des vides (voids ratio) en fonction du rapport volumique Eau/Poudre (W/CM ratio by volume) pour un taux de substitution donné de A/C (Kwan et al., 2012)

Lorsque le rapport E/P est élevé, les particules solides sont bien dispersées dans l'eau, la concentration solide est faible, et par conséquent le ratio des vides est important. A ce stade, les points expérimentaux se situent en haut à droite de la courbe et convergent vers la ligne droite notée $\varepsilon_a = 0$ représentant le ratio d'air nul. En effet, lorsqu'il y a une grande quantité d'eau, les vides sont comblés par l'eau et le ratio des vides devient égal au ratio d'eau, noté u_w . La diminution du rapport E/P engendre une augmentation de la concentration solide et, par conséquent, une diminution du ratio des vides. A ce niveau, l'eau ne comble plus la totalité des vides et le ratio des vides est dès lors égal à la somme du ratio d'air, noté u_a , et du ratio d'eau.

Le ratio d'air u_a est calculé par l'équation (2 – 2):

$$u_a = \frac{V_{paste} - V_{solid} - V_w}{V_{solid}} \quad (2 - 2)$$

Où V_w est le volume d'eau, donné par : $V_w = u_w V_{solid}$

Lorsque le rapport E/P est faible, il n'y a pas suffisamment d'eau pour bien disperser les particules solides, le ratio des vides augmente, ce qui engendre une diminution de la concentration solide. Il existe un rapport E/P pour lequel les particules solides sont alors resserrées de manière maximale. On en déduit donc la valeur minimale du volume des vides notée u_{min} pour un mélange de poudre à proportions données de ciment et d'addition minérale.

Finalement, la compacité maximale de cette pâte, pour une proportion donnée du mélange ciment et addition minérale, est calculée par la relation (2 – 3) :

$$\phi = \frac{1}{1 + u_{min}} \quad (2 - 3)$$

A partir des mesures de la masse volumique durant les essais, nous avons calculé les ratios des vides selon l'équation (2-1) en fonction du rapport E+SP/P pour chaque rapport métakaolin sur ciment MK/C. Les évolutions des ratios des vides en fonction du rapport E+SP/P, comme l'illustre la Figure 2 – 7a, permettent d'identifier la valeur minimale du ratio des volumes des vides et d'en déduire la compacité maximale pour chaque rapport MK/C (Figure 2 – 7b).

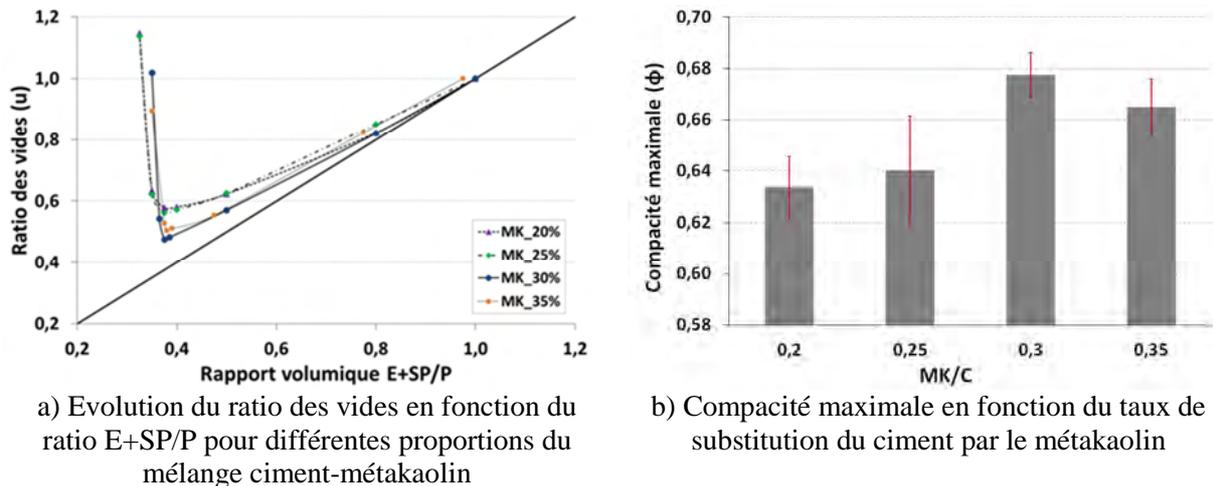


Figure 2 – 7 : Résultats des essais de compacité humide

Les résultats montrent que la compacité humide augmente lorsque le rapport massique MK/C passe de 0,20 à 0,30, qui correspond à la valeur maximale, puis diminue lorsque celui-ci atteint 0,35. Par rapport au ratio MK/C de 0,25 dans la formule initiale, nous obtenons un gain de compacité de 5,6% en passant à un ratio massique MK/C de 0,30. L'amélioration de la compacité peut être attribuée à un meilleur arrangement entre les particules de ciment et de métakaolin qui réduit les vides inter-particules.

2.1.4.2.3. Effets de la prise en compte de l'absorption du métakaolin et de l'optimisation du ratio MK/C

Pour pouvoir démontrer la nécessité de prendre en compte l'absorption d'eau par le métakaolin et l'amélioration de la compacité par optimisation de la proportion de cette ultrafine par rapport à la masse de ciment dans la mise au point des formulations de BFUP,

nous avons testé 3 compositions qui sont détaillées dans le Tableau 2 – 4. La première composition notée 880-2% est modifiée à partir de celle initiale testée durant l'étude préliminaire, où la quantité de métakaolin est de 30% au lieu de 25% en masse de ciment. La deuxième formule, notée 780-2% est dérivée à partir de celle optimisée (880-2%), avec une quantité de ciment réduite de 100 kg. Enfin, la dernière formule nommée 680-2% est aussi dérivée de celle optimisée, avec une teneur en ciment réduite de 200 kg. Dans tous les cas, la quantité de ciment manquante est remplacée par du sable afin d'obtenir les masses volumiques théoriques comparables. De même, le métakaolin est incorporé à 30% de la masse de ciment dans ces deux dernières formules.

Tableau 2 – 4 : Composition massique de 3 BFUP testés (en kg pour 1 m³ de béton)

		880_2%	780_2%	680_2%
Composition massique (kg)	Ciment	880	780	680
	Métakaolin	264	234	204
	Sable 0/2	896	1022	1135
	Fibres métalliques	160	160	160
	Superplastifiant	54	48	42
	Eau efficace	200	180	187
	Eau totale*	207	189	197
	Eau totale**	225	205	211
Rapport E _{efficace} /L		0,17	0,18	0,21
Fibres métalliques (% volumique)		2	2	2
Rapport massique MK/C		0,30	0,30	0,30
Masse volumique (kg/m ³)		2451	2413	2411
Étalement (cm)		30	32	31

* Eau totale calculée sans prendre en compte l'eau absorbée par le métakaolin

** Eau totale calculée avec prise en compte de l'eau absorbée par le métakaolin

La quantité de superplastifiant est de 4,7% de la masse de liant, les fibres sont incorporées à hauteur de 2% volumique. La prise en compte de l'absorption d'eau du métakaolin se fait au travers du calcul de l'eau totale. Nous pouvons constater un écart non négligeable de la teneur en eau totale (en rouge) calculée avec et sans la prise en compte du coefficient d'absorption d'eau de métakaolin.

Des gâchées de 5 litres ont été réalisées dans un malaxeur à mortier de 10 litres de capacité maximale. La séquence de malaxage est identique à celle de l'étude préliminaire. Grâce à la prise en compte de l'absorption d'eau du métakaolin dans le calcul d'eau de gâchage, la valeur de l'étalement est maintenue autour de 30 cm. Les bétons présentent une

bonne fluidité et homogénéité, sans ségrégation apparente. La mise en place des BFUP dans les éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm confectionnées pour évaluer les résistances mécaniques se fait par gravité sans vibration puisque les mélanges présentent un caractère autoplaçant. Les moules sont ensuite recouverts par un film plastique pour empêcher le départ de l'eau libre par évaporation. Ils sont conservés dans une salle humide ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $95\pm 5\%\text{HR}$) pendant 24 heures. Le démoulage est fait à 24 heures, puis les éprouvettes sont conservées dans la même salle humide jusqu'à l'échéance d'essai.

Afin d'identifier les formulations de BFUP les plus prometteuses qui seront l'objet de notre étude, il est nécessaire de réaliser une première évaluation à l'état durci des résistances mécaniques en compression et en traction par flexion. Les résultats des résistances mécaniques à 28 jours sont présentés sur la Figure 2 – 8 avec la confrontation avec ceux obtenus avec 25 % de métakaolin. L'absorption d'eau par le métakaolin n'a pas été prise en compte dans les formules où le métakaolin est incorporé à 25% de la masse de ciment.

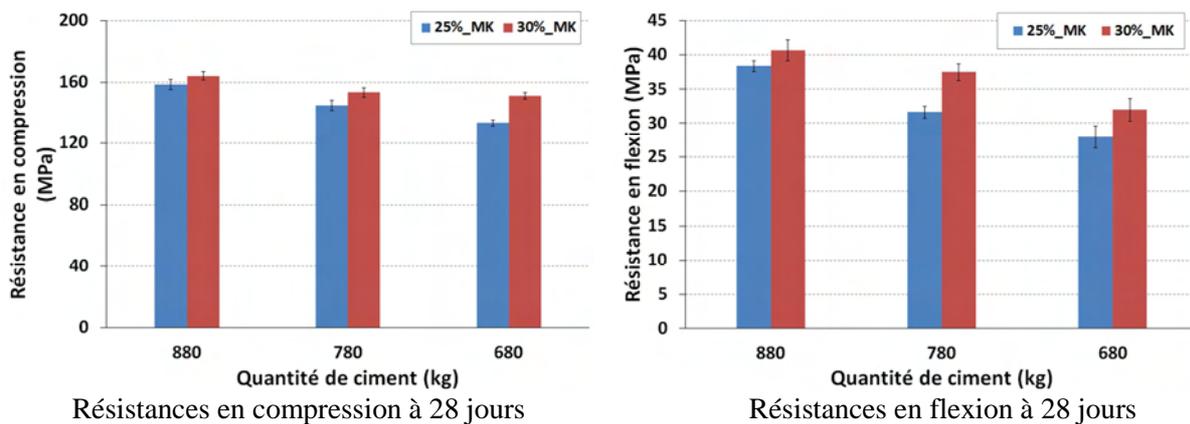


Figure 2 – 8 : Comparaison de résistances mécaniques à 28 jours des différentes formulations testées en fonction du dosage en ciment et du taux d'incorporation du métakaolin

Sur la base de ces résultats, nous constatons que les BFUP constitués de 30% de métakaolin par rapport à la masse du ciment présentent de meilleures performances mécaniques en comparaison des BFUP contenant 25% de métakaolin. Ainsi, et de manière globale, une augmentation des résistances mécaniques a été notée grâce à l'amélioration de la compacité du mélange. Cette augmentation est remarquable dans le cas où la quantité de ciment est réduite de 200 kg (soit 680 kg/m^3) par rapport à la formule initiale : + 17,6 MPa (soit +11,6%) en compression, et + 6,6 MPa (soit +19,2%) en flexion.

2.1.4.3. Formulations retenues

Les prises en compte de l'absorption d'eau du métakaolin et de l'optimisation du taux de substitution partielle de ciment par du métakaolin ont permis d'améliorer la fluidité et la compacité et ainsi les résistances mécaniques des formulations de BFUP. Ces aspects ont été vérifiés à travers les résultats issus de l'étude d'optimisation présentée précédemment.

Sur la base de cette étude préliminaire, nous avons établi 4 formulations détaillées dans le Tableau 2 – 5, qui seront l'objet d'étude de ce travail de recherche. La dénomination, les caractéristiques des formulations ainsi que les objectifs visés de chaque BFUP sont les suivants :

- 880-2%-FS : il s'agit de la formulation initiale du BFUP pour laquelle la masse de métakaolin est remplacée par de la fumée de silice. Ce choix est justifié par le fait que les BFUP commercialisés utilisent systématiquement la fumée de silice comme addition pouzzolanique. Cependant, son prix est 5 à 6 fois plus élevé que celui du métakaolin, ce qui impacte le coût final lié à la matière première des BFUP actuels. Cette formule plus « classique » fait donc office de BFUP de référence. Elle servira de base de comparaison pour les propriétés à l'état frais et à l'état durci par rapport à celles avec métakaolin ;
- 880-2%-MK : il s'agit de la formulation optimisée où le métakaolin est incorporé à 30% de la masse de ciment ;
- 680-2%-MK : il s'agit de la formulation dérivée de celle optimisée 880-2%-MK, pour laquelle la teneur en ciment est réduite de 200 kg et est compensée par du sable. Cette formule présente un coût de matières plus faible de celle optimisée 880-2%-MK, elle contient moins de ciment, et présente donc un meilleur bilan carbone, ce qui peut être appréciable dans certains projets de construction. La confrontation des résultats permettra d'estimer l'influence de la quantité de liant sur les propriétés du BFUP.
- 880-1,5%-MK : il s'agit de la formulation dérivée de celle optimisée 880-2%-MK, pour laquelle la fraction volumique en fibres est réduite à 1,5%. Cette formule vise à étudier l'influence du dosage en fibres vers les faibles valeurs de dosages qui sont peu étudiées d'après la bibliographie présentée dans le chapitre 1. En outre, les fibres métalliques constituent une part importante du coût de revient du matériau BFUP et leur utilisation impacte également significativement le bilan environnemental.

Tableau 2 – 5 : Composition en kg ou en % des formulations retenues pour l'étude de caractérisation

Matériaux	880-2%-FS	880-2%-MK	680-2%-MK	880-1,5%-MK
Ciment	880	880	680	880
Rapport massique Fumée de silice/Ciment	0,25	-	-	-
Rapport massique Métakaolin/Ciment	-	0,30	0,30	0,30
Sable 0/2	940	896	1135	910
Fibres métalliques (% volumique)	2	2	2	1,5
Rapport massique Superplastifiant/Liant	0,046	0,047	0,047	0,047
Eau efficace	225	200	187	200
Eau totale*	233	207	197	207
Eau totale**	-	225	211	225
Rapport Eau _{efficace} /Liant	0,20	0,17	0,21	0,17
Masse volumique (kg/m ³)	2480	2454	2408	2428
Coût matière par m ³ (€)	820	710	670	625

* Eau totale calculée sans prendre en compte l'eau absorbée par métakaolin

** Eau totale calculée avec prise en compte l'eau absorbée par métakaolin

D'un point de vue économique, les BFUP présentent un coût initial lié aux matériaux très élevé en comparant aux bétons ordinaires BO (le coût matière par m³ de béton ordinaire est d'environ 60 euros). En revanche, le prix des BFUP de la gamme Ductal[®] varie de 1500 à 2500 euros par m³. L'étude de prix présentée dans le Tableau 2 – 5 montre que l'utilisation du métakaolin permet de réduire de 13,4% par m³ le coût total lié aux matériaux lorsqu'on compare la formulation 880-2%-MK à la formulation de référence 880-2%-FS à base de fumée de silice (qui devrait avoir, et nous le vérifierons dans la suite de notre étude, des performances mécaniques comparables au 880-2%-MK d'après l'étude de (Taфраoui, 2009)).

Les quatre formulations fixées dans cette partie seront caractérisées à l'état frais et à l'état durci, au niveau du comportement mécanique et de la durabilité, dans la suite de ce mémoire afin d'identifier celles qui pourront aboutir à une production industrielle rationnelle. L'analyse comparative des propriétés de ces quatre bétons permettra également d'évaluer l'influence des paramètres de formulation sur leurs comportements.

Avant d'entamer le programme expérimental de caractérisation des formulations de BFUP à base de métakaolin, il était indispensable de mener une pré-étude de transfert de la confection du BFUP du laboratoire vers la centrale de préfabrication pour une production à l'échelle industrielle. En effet, le volume de gâchée, le type, la capacité et la puissance du malaxeur peuvent avoir des effets couplés significatifs sur les caractéristiques à l'état frais,

mais aussi à l'état durci des BFUP. Or, durant l'étude préliminaire, seulement 5 litres de béton ont été coulés dans un malaxeur à mortier de 10 litres. Ainsi, afin de s'assurer de la capacité de production à l'échelle industrielle, il est nécessaire de réaliser ce travail spécifique qui constitue une étape primordiale vis-à-vis de la finalité industrielle de ce projet de recherche.

2.2. Influence du type et de la capacité des malaxeurs

Cette partie décrit l'étude de l'influence du type de malaxeur (volume, type et mouvement de pales, puissance) et de leur capacité de production sur les propriétés de BFUP. Cette étape est décisive et indispensable pour notre projet de recherche car elle doit permettre de vérifier que le BFUP produit en centrale est comparable à l'état frais et à l'état durci à celui produit en laboratoire et que les paramètres liés aux dispositifs différents de malaxage n'impactent pas négativement les performances du matériau. Ce programme d'essai n'est pas exhaustif et n'a pas vocation à analyser finement l'influence de chaque paramètre intrinsèque au malaxeur. Il s'agit plutôt d'identifier l'influence globale des différents malaxeurs utilisés durant ce projet de recherche et d'en tirer des préconisations pour le process de production en usine.

Nous nous limiterons à exploiter les valeurs d'étalement au mini cône et de résistance en compression des éprouvettes conservées en condition endogène afin d'analyser uniquement l'effet du type de malaxeur.

Nous avons choisi la composition 880-2%-MK pour cette étude. Elle a été confectionnée dans trois malaxeurs à différents volumes. Le programme expérimental de cette partie d'étude est présenté dans le Tableau 2 - 6.

Tableau 2 - 6 : Programme expérimental établi pour l'étude de l'influence du type de malaxeur

Caractéristiques du malaxeur	Volume de béton confectionné (Litres) et pourcentage de remplissage du malaxeur	Cure	Essais d'étalement au mini cône	Type d'éprouvettes confectionnées	
				prisme 4*4*16 cm	cylindre 11*22 cm
Malaxeur à mortier de 10 litres (NF EN 196-1) LMDC	5 (50%)	Endogène	Oui	Oui	Non
Malaxeur à béton de 200 litres à train valseur LMDC	80 (40%)	Endogène	Oui	Oui	Oui
Malaxeur à béton de 750 litres à train valseur Entreprise Lagarrigue	300 (40%)	Endogène	Oui	Non	Oui

Le passage de 5 litres fabriqués avec un malaxeur à mortier au 80 litres fabriqués avec un malaxeur à béton le tout réalisé au laboratoire LMDC permettra de vérifier s'il est envisageable de confectionner du BFUP à grand volume avec un malaxeur conventionnel à béton sans impacter la durée de malaxage, ni la valeur d'étalement au mini cône. Après validation, nous pourrions tester la production de BFUP à l'échelle industrielle avec un malaxeur à béton de capacité 750 litres.

2.2.1. Analyse des évolutions de la puissance de malaxage sur malaxeur à train valseur de laboratoire

Dans un premier temps, nous allons analyser le comportement d'un malaxeur du laboratoire en termes d'évolution de puissance de malaxage durant les différentes étapes de malaxage afin de donner des informations en vue de la production ultérieure en usine. Le malaxeur à béton de capacité 200 litres du LMDC est équipé d'un wattmètre enregistreur pour suivre la puissance fournie durant le malaxage. A partir des données acquises par le wattmètre, nous pouvons connaître la puissance maximale à fournir par le malaxeur pour produire du BFUP sans risque. Il est important de préciser que la séquence de malaxage est celle définie durant l'étude préliminaire.

La Figure 2 – 9 représente l'évolution de la puissance du malaxeur en fonction du temps durant la phase de malaxage.

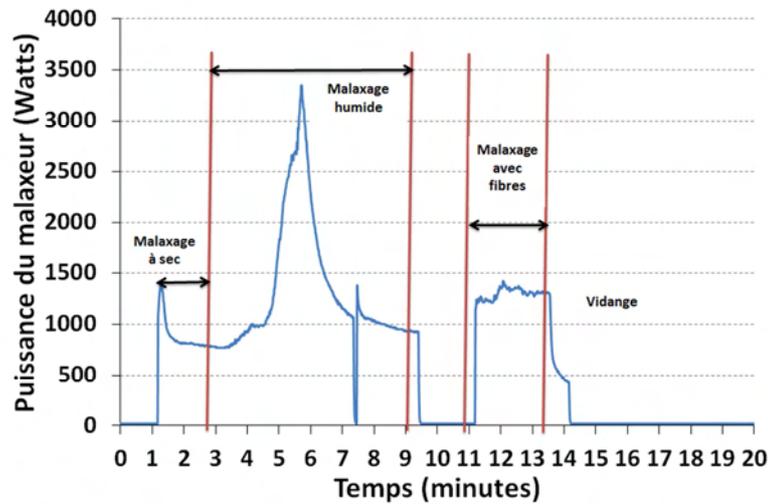


Figure 2 – 9 : Suivi de la puissance développée par le malaxeur pendant le malaxage (enregistrement du Wattmètre)

Nous pouvons identifier différentes phases de malaxage. Le premier pic de puissance, autour de 1400 Watts correspond au début du malaxage à sec des matériaux. Lorsque la puissance se stabilise autour de 850 Watts, l'introduction de l'eau et du superplastifiant peut commencer. Une fois l'eau et le superplastifiant introduits, la puissance augmente rapidement, cette phase correspondant à la dispersion des grains. La puissance atteint une valeur maximale de 3350 Watts, qui correspond à la moitié de la puissance maximale du malaxeur. Lorsque les grains sont bien dispersés dans l'eau de gâchage, la puissance du malaxeur diminue progressivement, et se stabilise autour de 1000 Watts. Le malaxage humide peut durer entre 6 et 8 minutes pour bien s'assurer de l'homogénéisation du matériau. Une fois le mélange fluide, le malaxeur est arrêté pour introduire manuellement les fibres métalliques. La présence de fibres induit une légère augmentation de la puissance, autour de 1400 Watts. Le malaxage avec fibres dure environ 2 minutes, le béton peut ensuite être vidangé. Le temps de malaxage total est de 14 minutes, ce qui peut être considéré comme comparable à celui obtenu sur le malaxeur de 10 litres, d'environ 12 minutes. La valeur d'étalement obtenue est de 31 cm traduisant une maniabilité équivalente.

2.2.2. Etude comparative des propriétés des BFUP confectionnés dans différents malaxeurs

La capacité de production de BFUP avec un malaxeur conventionnel, par rapport à celui de 10 litres pour mortiers utilisé dans les études préliminaires, est donc validée en laboratoire. A ce stade, nous pouvons donc envisager une production à l'échelle industrielle. Pour cela, 300 litres de béton ont été confectionnés dans un malaxeur à train valseur de capacité

maximale de 750 litres à l'usine de préfabrication de Lagarrigue. Afin de confirmer que le BFUP produit dans un malaxeur de 10 litres est sensiblement le même que celui produit dans un malaxeur de 200 et 750 litres, nous montrons dans le Tableau 2 - 7 et sur la Figure 2 - 10 les résultats obtenus respectivement à l'état frais et à l'état durci, après cure endogène, du BFUP testé.

Tableau 2 - 7 : Valeurs d'étalement au mini cône obtenues pour la formule 880-2%-MK en fonction du type de malaxeur

Type de malaxeur	Temps de malaxage (minutes)	Etalement au mini cône (cm)
10 L	12	30
200 L	14	31
750 L	16	31

Le temps de malaxage relevé pour les 3 types malaxeurs varie entre 12 et 16 minutes. Il est important de préciser que l'ajout de fibres se fait manuellement, ce qui peut expliquer l'écart du temps de malaxage puisque les quantités de fibres à ajouter sont très variables et qu'elles ne sont pas déversées instantanément, mais en continu. Du point de vue industriel, la mise au point d'un dispositif mécanisé d'introduction des fibres calé sur les mesures d'un wattmètre devrait permettre un gain de temps appréciable.

Après le malaxage, un essai d'étalement au mini cône a été effectué sur les gâchées issues de chaque malaxeur utilisé, des valeurs de 30 cm à 31 cm ont été obtenues traduisant une bonne fluidité du mélange. Ceci montre une bonne reproductibilité à l'état frais de la formule testée aux différentes échelles.

La Figure 2 - 10 présente les évolutions en fonction du temps de la résistance moyenne en compression du BFUP 880-2%-MK, après cure endogène, obtenues sur différents malaxeurs.

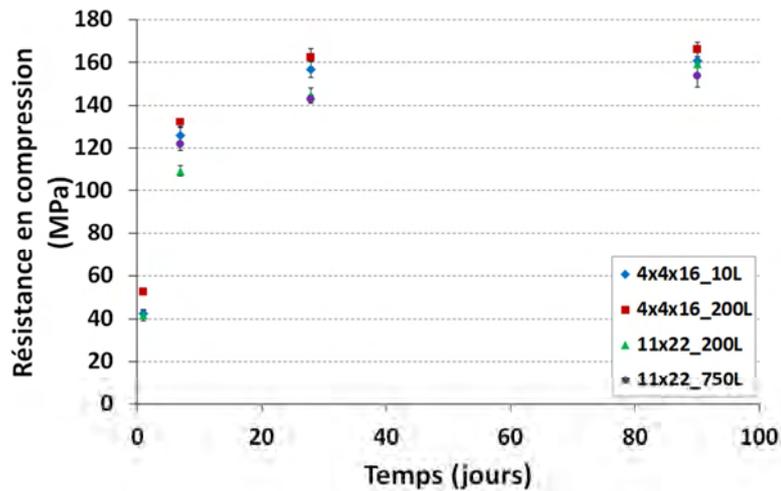


Figure 2 - 10 : Evolution en fonction du temps de la résistance moyenne en compression (après cure endogène) du béton 880-2%-MK fabriqué avec différents malaxeurs

Pour nous affranchir de l'effet d'échelle sur la résistance en compression, nous allons mener les analyses comparatives entre deux malaxeurs pour un même type de géométrie d'éprouvettes. La confrontation des valeurs de résistances moyenne en compression sur les éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm confectionnées dans des malaxeurs de 10 et 200 litres montre que les meilleures résistances sont obtenues avec le malaxeur à train valseur de 200 litres, avec un gain de 18,9% à 1 jours et de 3,4% à 28 et 90 jours. La comparaison entre les valeurs de résistances moyennes en compression des éprouvettes 11x22 cm issues des gâchées confectionnées dans des malaxeurs à train valseur de 200 et 750 litres montre un faible écart à 28 et 90 jours, 1,4% et 3,7% respectivement. On peut également noter la faible dispersion des valeurs quelle que soit l'échéance. En termes d'effet d'échelle, on observe que les résistances mesurées sur éprouvettes 4x4x16 cm sont supérieures à celles obtenues sur éprouvettes cylindriques, ce qui est un résultat bien connu dû au frottement.

On peut donc en conclure que pour des volumes de gâchées représentant un taux de remplissage de 40% ou 50%, les malaxeurs à train valseur utilisés au LMDC et en usine permettent d'obtenir de meilleures résistances en compression, notamment au jeune âge, ce qui est particulièrement intéressant en préfabrication.

2.3. Influence des conditions de cure sur les propriétés mécaniques

Cette partie d'étude a pour l'objectif d'évaluer l'effet des conditions de conservation sur le développement des résistances mécaniques afin de proposer des recommandations à l'industriel vis-à-vis de la protection des éléments préfabriqués. L'étude a été réalisée sur la

même formule 880-2%-MK que celle qui a servi pour l'étude de l'influence du type de malaxeur. Pour cela, des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm ont été confectionnées, puis 3 conditions de cure, humide, endogène et dessiccation ont été appliquées après le démoulage des éprouvettes, soit à 24 heures. En condition humide, les éprouvettes ont été conservées dans la salle humide réglée à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $95\pm 5\%$ d'Humidité Relative (HR). En condition endogène, les éprouvettes ont été protégées de tout échange hydrique avec le milieu extérieur et maintenues à 20°C . En condition dessiccation, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre à l'extérieur du LMDC, en période hivernale de janvier à février (appelé aussi séchage extérieur). Seules les conditions de conservation, température et hygrométrie, sont différentes, les éprouvettes de même géométrie ayant été confectionnées dans le même malaxeur.

La Figure 2 - 11 présente l'évolution des résistances en compression et en flexion, pour les cures humide, endogène et en dessiccation.

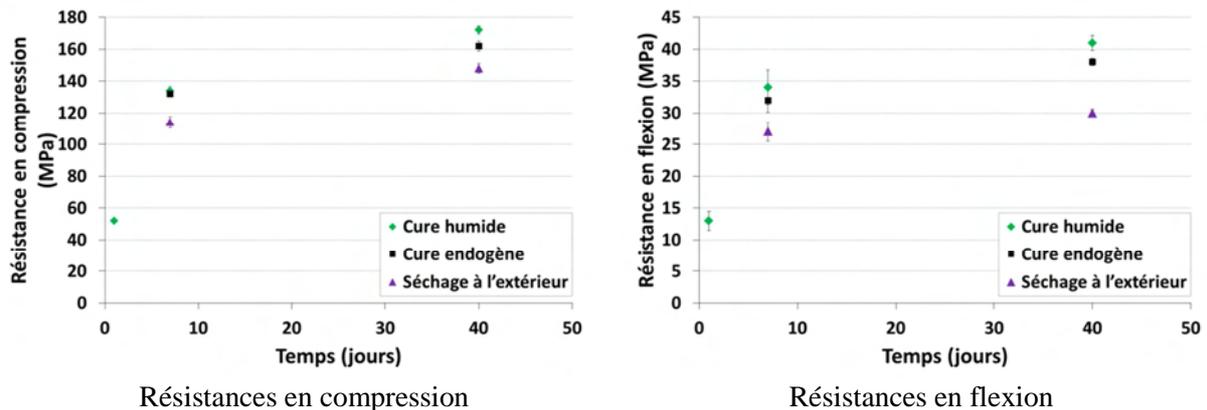


Figure 2 - 11 : Evolutions des résistances moyennes en compression et en flexion en fonction des différentes cures : humide, endogène, et en dessiccation (séchage extérieur)

Les résultats montrent une légère diminution de la résistance en compression des éprouvettes en cure endogène par rapport à celles en cure humide, -1,5% et -5,8% à 7 et 40 jours respectivement. En revanche, une plus forte réduction en condition de séchage à l'extérieur par rapport à la cure humide apparaît : -14,9% et -13,9% à 7 et 40 jours respectivement. La même tendance de diminution pour la résistance en flexion est détectée, -7,3% et -5,8% à 7 et 40 jours respectivement en cure endogène, -20,5% et -26,8% à 7 et 40 jours pour les éprouvettes exposées à l'extérieur.

Ainsi, la résistance en compression à 7 jours est quasiment identique entre la cure endogène et la cure humide. A 40 jours, la résistance en compression en cure humide est

supérieure de 10 MPa. Si l'on s'intéresse maintenant à la cinétique de développement des résistances, on constate que les valeurs à 7 jours en cure endogène représentent 76% de la résistance en compression à 40 jours en cure humide, alors qu'en séchage, couplé vraisemblablement à des températures assez faibles qui ralentissent les réactions d'hydratation, elle n'a atteint que 66%. Il est donc préférable de protéger le béton de la dessiccation au minimum pendant 7 premiers jours afin de garantir les propriétés mécaniques, tout en le conservant à une température modérée pour éviter des retards de prise. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de (Byfors, 1980), qui a montré que dans le cas des bétons ordinaires, l'absence de cure humide au jeune âge peut provoquer un ralentissement voire un arrêt précoce de l'hydratation induisant une baisse de résistance de 10% à 25% selon la durée d'exposition à une humidité relative de 50%. Lorsque l'humidité ambiante diminue, l'eau présente dans les pores capillaires s'évapore, conduisant à une diminution de la quantité d'eau disponible pour l'hydratation. Le taux d'hydratation est ainsi fortement diminué. Ceci serait donc d'autant plus préjudiciable que le dosage en eau d'un BFUP est extrêmement faible. C'est pourquoi les essais normalisés selon la norme (EN 12390, 2009) pour les bétons courants, et la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) préconisent de conserver les éprouvettes dans une piscine (ou une salle humide), ou de les protéger de la dessiccation afin d'éviter les effets néfastes sur l'évolution des propriétés mécaniques.

Par conséquent, en pratique industrielle en usine de préfabrication, il est préconisé de conserver les éprouvettes de contrôle à l'abri des chocs, des vibrations, et de la dessiccation pendant au moins 16 heures avant le démoulage à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (EN 12390, 2009). Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour éviter la dessiccation pendant le durcissement. En revanche, pour les éléments de structures préfabriqués, ce type de conservation n'est évidemment pas envisageable. Compte tenu des résultats des effets de l'étude sur les conditions de cure, il convient donc de les protéger de la dessiccation pendant au moins les 7 premiers jours, soit avec les bâches hermétiques, soit avec des produits de cure, afin d'éviter l'évaporation de l'eau durant les premiers jours d'hydratation et de garantir les propriétés mécaniques optimales. Deux types de produits de cure peuvent être appliqués, l'un après le coulage pour les surfaces talochées, et l'autre après le démoulage pour les surfaces coffrées. La température, elle, joue sur la cinétique des réactions d'hydratations. On pourrait donc prévoir la mise en place de dispositifs spécifiques maintenant des températures modérées des pièces en BFUP, en période hivernale par exemple, pour atteindre les résistances requises pour leur démoulage ou leur manutention.

CONCLUSIONS

Ce chapitre retranscrit l'étude de mise au point de formulations de BFUP à moindre coût de production par rapport aux BFUP existant sur le marché actuel. Les solutions envisagées résident dans l'utilisation du métakaolin à la place de la fumée de silice, d'un sable siliceux local se situant à 100 km environ du site de préfabrication, et dans l'absence de traitement thermique.

Une étude préliminaire a permis d'identifier 2 paramètres à prendre en compte qui permettent d'augmenter les performances mécaniques. Le premier est lié à la forte capacité d'absorption d'eau du métakaolin non prise en compte par la norme (NF 206-1, 2014) dans le calcul de l'eau efficace et qui affecte la maniabilité, la mise en œuvre et donc les résistances. Le second est lié à l'amélioration de la compacité par la recherche de l'optimum du couple ciment/métakaolin. Des essais originaux de mesure d'absorption d'eau de métakaolin développée par (Mechling et al., 2003) et d'optimisation du taux de substitution partielle de ciment par du métakaolin, par la méthode dite de « compacité humide » développée par (Kwan et al., 2012), ont été réalisés sur nos matériaux. A partir d'une formulation issue de la bibliographie et des résultats de ces essais, à savoir une compacité optimale pour un ratio métakaolin sur ciment MK/C égal à 30%, et un coefficient d'absorption d'eau du métakaolin de 8% pris en compte dans l'eau totale, nous avons mis au point 3 compositions de BFUP à base de métakaolin. La première 880-2%-MK contient 880 kg de ciment, a un rapport MK/C de 30%, et une fraction volumique de 2% de fibres métalliques. La deuxième 680-2%-MK découle de la première puisqu'elle a également un rapport MK/C de 30%, et une fraction volumique de 2% de fibres métalliques, mais ne contient que 680 kg de ciment. Elle permettra d'estimer l'influence de la quantité de liant sur les propriétés du BFUP. Le BFUP 880-1,5%-MK dérive également de 880-2%-MK mais n'incorpore que 1,5% de fibres. Cette formule vise à étudier l'influence du dosage en fibres, vers les faibles valeurs de dosages, sur les performances du BFUP. Les deux dernières formulations présentent aussi l'intérêt de réduire le coût du matériau et son impact environnemental. Une formulation 880-2%-FS à base de fumée de silice (FS), addition pouzzolanique utilisée dans la grande majorité des BFUP existants, a également été établie avec un rapport FS/C de 25% et servira de référence pour la suite de notre projet.

Les résultats préliminaires obtenus pour ces compositions ont montré que l'exigence à l'état frais a été satisfaite, avec la valeur minimale d'étalement au mini cône de 30 cm qui

traduit l'aptitude autoplçante des matériaux. A l'état durci, les résistances en compression varient entre 151 MPa et 167 MPa, et les résistances en flexion varient de 34 MPa à 41 MPa. Ces résultats particulièrement encourageants montrent l'intérêt de l'étude de compacité humide et de la prise en compte de l'eau absorbée par le métakaolin, et la pertinence de substituer la fumée de silice par cette autre ultrafine.

La problématique de la faisabilité de confectionner un BFUP à l'usine équivalent à celui obtenu en laboratoire a été traitée. Une première étude s'est focalisée sur l'influence du type de malaxeur, deux du laboratoire et celui de l'usine, sur l'ouvrabilité et les résistances d'un BFUP. De manière globale, la production industrielle de BFUP avec un malaxeur conventionnel à train valseur permet d'atteindre les performances identiques à celles obtenues sur les deux malaxeurs du laboratoire, pour des taux similaires de remplissage de 40%. Une étude complémentaire s'est intéressée aux conditions de cure afin de proposer des préconisations pour la conservation des pièces en BFUP à l'usine. L'analyse des résistances obtenues en cure humide, cure endogène et en dessiccation montre qu'il est fortement recommandé de protéger les éléments préfabriqués de la dessiccation durant les 7 premiers après coulage a minima, afin de maintenir des performances mécaniques les plus proches possibles de celles obtenues en cure humide à 20°C.

La réussite de ce transfert de formulation du laboratoire vers l'usine permet désormais d'entamer l'étude en laboratoire des caractérisations à l'état frais et à l'état durci de l'ensemble des BFUP étudiés.

CHAPITRE 3 : COMPORTEMENT A L'ETAT FRAIS

INTRODUCTION

Ce chapitre concerne l'étude du comportement à l'état frais des quatre formulations de BFUP établies dans le chapitre 2. Lors de la synthèse bibliographique du chapitre 1, nous avons vu que peu d'études (Bonneau et Vernet, 1998) se sont intéressées sur cet aspect des BFUP. Ces auteurs ont constaté que les BFUP présentent un caractère thixotropique marqué, et que leurs propriétés rhéologiques diminuent au cours du temps dès la fin de malaxage. Il est donc pertinent dans notre projet d'évaluer les propriétés à l'état frais des quatre BFUP formulés dans le précédent chapitre. Cette étude a pour objectif majeur de donner des éléments de réponse à l'industriel afin de proposer des préconisations et des « bonnes » pratiques de production et de mise en œuvre de ces nouveaux matériaux en usine de préfabrication. En parallèle, elle contribue à compléter l'état de connaissance sur ces matériaux vis-à-vis des propriétés à l'état frais et à évaluer l'influence des paramètres de formulations grâce aux différences entre nos quatre BFUP.

Dans la pratique industrielle, les mesures d'affaissement au cône d'Abrams, ou d'écoulement dans la boîte en L, sont utilisées pour caractériser le comportement de béton autoplaçant à la sortie du malaxeur. Ces essais ne permettent cependant pas de rendre compte de manière complète et précise de la rhéologie du béton à l'état frais. Or, la mise en œuvre a un impact sur le comportement structural des éléments fabriqués, surtout lorsqu'il s'agit des BFUP. (Bonneau et Vernet, 1998) ont ainsi constaté que les BFUP présentent un comportement rhéologique de type Binghamien et que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin de malaxage. Par conséquent, le délai de mise en œuvre de ces matériaux doit être respecté pour éviter les défauts de coulage qui affecteraient leurs propriétés mécaniques. Les auteurs ont également observé le caractère thixotropique de ce matériau qui traduit le fait que si, après un long temps de repos, une vitesse de cisaillement est brusquement appliquée puis maintenue fixe, la viscosité apparente du matériau décroît avec la durée de l'écoulement, et le matériau retrouve son état initial.

(Roussel, 2006), (Roussel, 2008) et (Roussel et al., 2012) ont montré que la thixotropie des bétons autoplaçants peut provoquer une hétérogénéité de la structure finale entraînant ainsi une chute des performances mécaniques dans le cas de coulage en multicouches lorsque le délai entre deux séquences de bétonnages n'est pas respecté. En revanche, ce phénomène n'a pas été traité de manière approfondie pour les BFUP, ce qui justifie cet axe d'étude. En effet, même si les éléments en BFUP sont de faible épaisseur comme les dalles de ponts, les

prédalles servant de coffrages perdus, certaines poutres précontraintes, etc., ils nécessitent dans certains cas un volume de béton important, rendant le bétonnage en plusieurs couches inévitable. Dans une telle configuration, il est indispensable d'effectuer une évaluation du délai de recouvrement entre deux bétonnages successifs vis-à-vis des problèmes causés par la thixotropie, sachant que le temps de malaxage peut être jusqu'à six fois plus long que celui des bétons ordinaires (entre 1 et 2 minutes), comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents.

Ce chapitre est divisé en trois parties. La première présente les méthodes et matériels utilisés pour la caractérisation des propriétés rhéologiques. La deuxième partie détaillera les résultats des propriétés rhéologiques des BFUP obtenues dès la fin de malaxage et leurs évolutions dans le temps. Enfin, à partir des résultats obtenus, des recommandations seront proposées dans une troisième partie pour permettre une bonne pratique industrielle pour la mise en œuvre de ces nouveaux matériaux en préfabrication.

3.1. Matériels et méthodes

Nous avons établi un programme expérimental spécifique pour étudier le comportement à l'état frais de nos BFUP. L'objectif est de caractériser les propriétés statiques des bétons par les essais usuellement pratiqués en usine, de déterminer les propriétés d'écoulement par les mesures au rhéomètre, et d'étudier le caractère thixotrope des BFUP afin de proposer des préconisations pour la préfabrication des éléments de structure.

Pour chaque béton et chaque gâchée, des mesures d'étalement au mini cône, d'écoulement à la boîte en L, et au rhéomètre ont été réalisées. Les échéances étudiées pour tous les essais listés sont les suivantes : à l'instant initial (t_0) qui correspond à la sortie du malaxeur ; après 10 minutes de repos (t_0+10) ; après 15 minutes de repos (t_0+15) ; et après 20 minutes de repos (t_0+20), ce qui signifie que le béton est laissé au repos dans le bol de mesure pendant respectivement 5 min, 10 min, 15 min, et 20 min. Le temps de repos est décompté à partir de la fin de malaxage jusqu'au moment de l'essai. Il est important de préciser que le temps entre le moment de l'introduction d'eau et la fin de malaxage est de 8 à 10 minutes, auquel il faut donc ajouter le temps de repos maximal étudié (20 minutes). Nous pouvons donc considérer que la plage de temps investiguée demeure inférieure ou égale à 30 minutes, ceci afin d'éviter toute influence des phénomènes irréversibles de l'hydratation sur la thixotropie (Legrand, 1972), (Roussel, 2006a).

L'ensemble des essais est donc effectué durant la période de 30 minutes à compter du moment où l'eau et le ciment sont en contact. Ce temps est également choisi par rapport à celui du cycle de fabrication à l'usine de préfabrication, qui est de 26 minutes environ. Pour respecter ces temps de repos, une nouvelle gâchée est par conséquent fabriquée pour chaque échéance de mesure. De plus, lorsque le béton est laissé au repos, le bol le contenant est recouvert d'un tissu humide afin de limiter l'évaporation de l'eau libre. Les mesures au rhéomètre sont effectuées dans une salle à 20°C.

Nous avons donc réalisé quatre gâchées de béton par formulation, ce qui fait au total 16 gâchées pour les quatre BFUP étudiés. Nous avons décidé de confectionner chaque fois 8 litres de béton dans un malaxeur de capacité de 10 litres avec la même procédure de malaxage que décrite ci-après.

3.1.1. Procédure de malaxage

Le protocole de malaxage correspond à celui défini dans le chapitre 2 :

- Introduction successive de la moitié de la quantité de sable, de la totalité du ciment, du métakaolin ou de la fumée de silice, et de l'autre moitié de sable ;
- Malaxage de l'ensemble des matériaux introduits pendant 2 minutes ;
- Introduction de l'ensemble eau et superplastifiant puis malaxage jusqu'à fluidification (variable selon la formulation) ;
- Introduction des fibres, puis malaxage pendant 2 minutes.

Le temps de malaxage a été relevé pour chaque BFUP et résumé dans le Tableau 3 – 1.

Tableau 3 – 1 : Temps de malaxage des BFUP étudiés

	880_2%_FS	880_2%_MK	880_1,5%_MK	680_2%_MK
Temps de malaxage (minutes)	10	12	12	12

Nous pouvons observer que le temps de malaxage du BFUP incorporant la fumée de silice est inférieur à ceux des BFUP contenant du métakaolin. Ceci peut être expliqué par la forme de type billes des grains de fumée de silice qui facilite leur dispersion.

3.1.2. Essai d'étalement au mini cône et d'écoulement à la mini-boîte en L

Durant cette étude, l'ouvrabilité et l'aptitude à l'écoulement des BFUP ont été étudiées par le biais des mesures d'étalement au mini-cône et des mesures du temps d'écoulement à la mini-boîte en L (Figure 3 – 1).

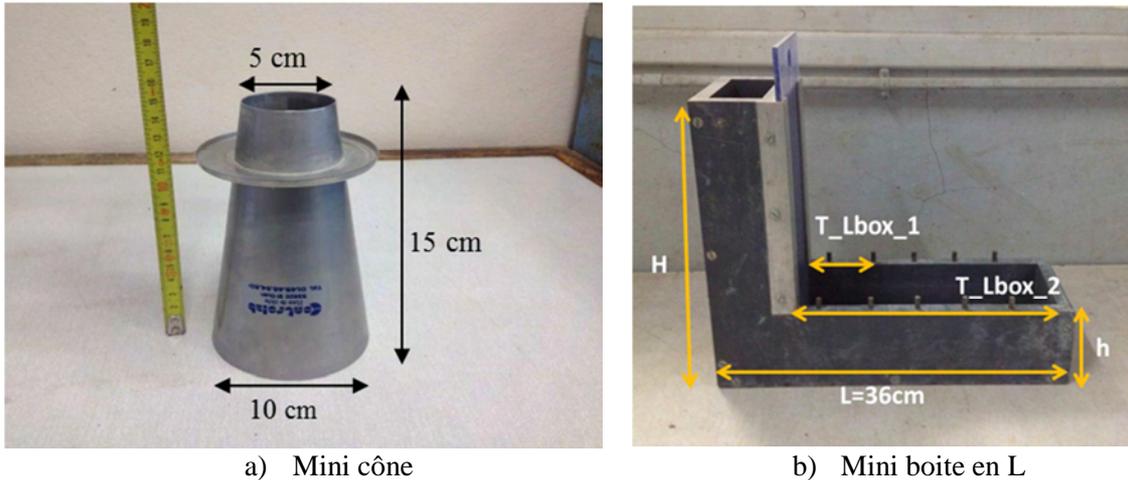


Figure 3 – 1 : Equipement pour les mesures d'étalement au mini cône et d'écoulement de la boîte en L

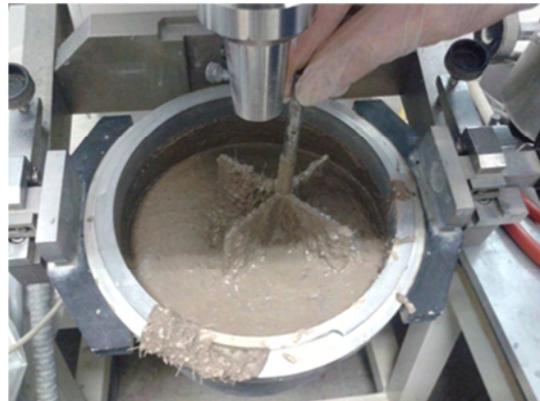
Chacune des dimensions du mini-cône correspond à celle du cône d'Abrams à l'échelle $\frac{1}{2}$ (NF EN 12350-2, 2012). La mesure d'étalement au mini-cône permet de mesurer la maniabilité des bétons selon la norme (NF EN 12350-2, 2012). La valeur de l'étalement correspond à la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton. Cet essai permet de surveiller aussi visuellement les éventuelles ségrégations du BFUP, notamment des fibres, et la formation de laitance excessive. Les essais d'écoulement à la mini-boîte en L permettent de caractériser l'aptitude à l'écoulement du béton. La mini-boîte en L utilisée a des dimensions de 30 cm de hauteur (H), de 36 cm de longueur (L), et de 7,5 cm de petite hauteur (h). La section de la partie verticale est de 5x10 cm, et la largeur de la partie horizontale est de 10 cm. La mesure du temps d'écoulement à la mini-boîte en L a été réalisée au niveau des deux repères, comme le montre la Figure 3 – 1b. Le premier temps d'écoulement T_{Lbox_1} est relevé lorsque le front de béton arrive au point de repère (1) se situant à 8,5 cm du bord. Le deuxième temps d'écoulement T_{Lbox_2} est relevé lorsque le front de béton arrive au bord extrême de la boîte en L à 28,5 cm. Il est rappelé que ces essais ont été effectués immédiatement après la fin du malaxage et après chaque temps de repos.

3.1.3. Mesures au rhéomètre

En parallèle des mesures d'étalement et d'écoulement à la mini-boîte en L, des mesures de grandeurs rhéologiques ont été enregistrées à l'aide d'un rhéomètre à béton développé par CAD Instrumentation. L'objectif est de caractériser finement le comportement rhéologique à l'état frais en déterminant notamment les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité plastique. Le principe de fonctionnement de l'appareil est le même que celui du rhéomètre de Couette où le cylindre extérieur est assimilé à la paroi du bol qui reste fixe (R1) et le cylindre intérieur est assimilé à celui du matériau cisailé par le mobile à ailettes (R2), en rotation lors de l'essai, comme le montre la Figure 3 – 2. Cet appareil fonctionne à vitesse de cisaillement contrôlé, et il mesure le couple nécessaire pour cisailier un échantillon de béton d'environ 2 litres. Le bol de mesure a des dimensions de 15 cm de diamètre et de 8 cm de hauteur. Le mobile est composé de 4 ailettes (Figure 3 – 2b) pour éviter le « patinage » pendant le cisaillement.



a) Rhéomètre CAD 200



b) Bol rempli de béton et mobile

Figure 3 – 2 : Dispositif de mesure des paramètres rhéologiques (Cyr et Mouret, 2003)

Pour évaluer les paramètres rhéologiques, les mesures au rhéomètre ont été réalisées en trois phases, comme l'indique la Figure 3 – 3 :

- Durant la première phase (1), à vitesse de cisaillement lente d'environ 1 tour/min, l'enregistrement du couple de cisaillement en fonction du temps nous permet

d'obtenir le couple maximal avant l'écoulement qui correspond au seuil statique de cisaillement du béton.

- Durant la deuxième phase (2), la vitesse de cisaillement est augmentée très rapidement jusqu'à 30 tours/min et est maintenue pendant environ 150 s afin de déstructurer le matériau (Legrand, 1972), (Roussel, 2006a).
- Enfin, durant la troisième phase (3), la vitesse de cisaillement est diminuée par palier (20 tours/min, 10 tours/min, 5 tours/min) afin de déterminer le couple moyen de cisaillement de chaque palier en fonction du gradient de vitesse.

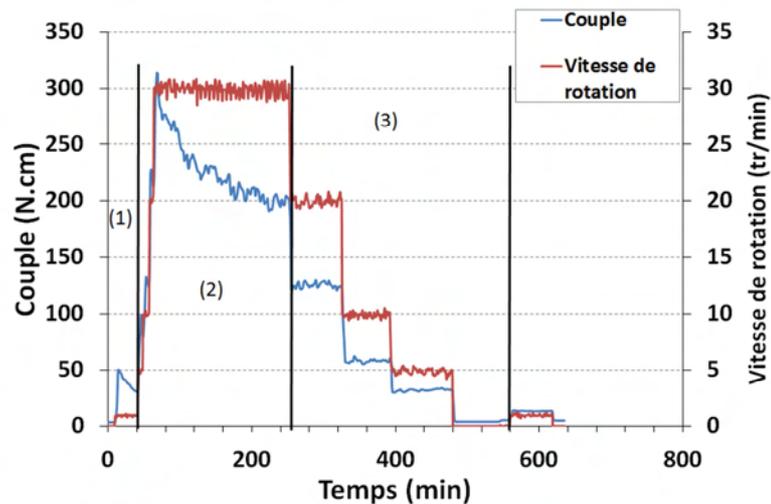


Figure 3 – 3 : Représentation du couple ou de la vitesse de rotation en fonction du temps

A partir de ces mesures, les courbes d'écoulement, à savoir la relation contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse, la viscosité, et le seuil statique sont calculés. Il est important de préciser que durant les essais aucune vibration n'est appliquée compte tenu du caractère autoplaçant des BFUP étudiés, ce qui permet de rendre compte du comportement rhéologique dans les conditions réelles de mise en œuvre de ces matériaux.

3.1.4. Exploitation des données brutes des mesures au rhéomètre

A partir des enregistrements du couple et de la vitesse de rotation appliquée en fonction du temps, nous pouvons construire les courbes d'écoulement des BFUP. Il s'agit de la relation entre la contrainte de cisaillement, notée τ , en fonction de la vitesse cisailée, notée $\dot{\gamma}$. La détermination de la contrainte de cisaillement est basée sur l'hypothèse d'une distribution uniforme des contraintes sur la face latérale et d'une distribution linéaire aux extrémités. La contrainte de cisaillement τ est calculée par l'intermédiaire de la relation (3 – 4) (Cyr, 1999) :

$$\tau = \frac{M}{2\pi R^2 H + \pi R^3} \quad (3-4)$$

Où :

- τ est la contrainte de cisaillement exprimée en (Pa)
- M est le couple résistant enregistré par le rhéomètre, exprimé en (N.m)
- H est la hauteur du mobile à ailette (sans la tige) en (m)
- R est le rayon du mobile à ailette en (m)

Dans le cas d'un cisaillement qui induit un écoulement dans la totalité de l'entrefer, (Estellé et al., 2008) proposent de calculer le gradient de vitesse selon la relation (3 – 5) :

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{1 - \frac{R_i^2}{R_e^2}} - \frac{\Omega - M \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\ln\left(\frac{R_i}{R_e}\right)} \quad (3-5)$$

Où :

- $\dot{\gamma}$ est le gradient de vitesse de cisaillement en (1/s)
- M est le couple résistant enregistré avec le rhéomètre, exprimé en (N.m)
- Ω est la vitesse de rotation du mobile à ailette en (rad.s⁻¹)
- R_i est le rayon du mobile à ailette en (m)
- R_e est le rayon du bol d'essai en (m)

La vitesse de rotation (Ω) peut être reliée au couple résistant (M) par la relation suivante : $\Omega = A + B * M^C$ avec A, B, et C qui sont les paramètres de calage par rapport aux points expérimentaux (valeurs calées en utilisant la méthode des moindres carrées).

3.2. Résultats et discussions

Nous présentons dans cette partie l'ensemble des résultats du comportement à l'état frais des quatre formulations de BFUP retenues, ainsi que leurs analyses. Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'exploitation des mesures d'étalement et d'écoulement à la mini-boite en L. Nous présenterons ensuite les données rhéologiques et les propriétés d'écoulement. Les résultats seront analysés en distinguant les valeurs des propriétés rhéologiques obtenues immédiatement après le malaxage et celles en fonction du temps de repos.

3.2.1. Propriétés rhéologiques immédiatement après le malaxage

3.2.1.1. Essais d'étalement au mini-cône et d'écoulement à la mini-boîte en L

Les mesures d'étalement au mini-cône et d'écoulement à la mini-boîte en L ont été réalisées après chaque temps de repos. Nous présentons sur la Figure 3 – 4 les valeurs d'étalement (a) au mini-cône et de temps d'écoulement (b) mesurées à la mini-boîte en L à l'instant initial t_0 pour tous les bétons étudiés.

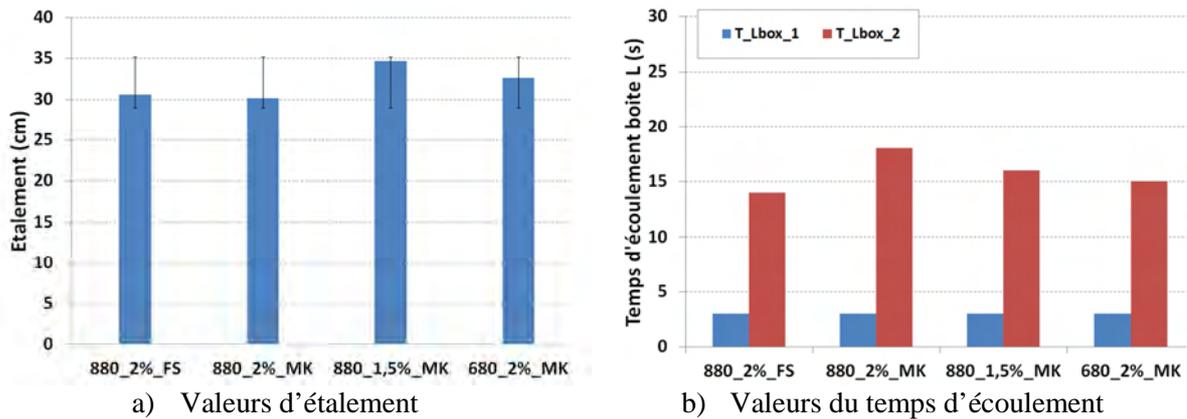


Figure 3 – 4 : Etalements au mini-cône et temps écoulement à la mini-boîte en L à t_0

Les valeurs d'étalement des BFUP au mini-cône sont comprises entre 30 cm et 34 cm, ce qui est conforme à la valeur conseillée par (Wille et al., 2012). Compte tenu de la dispersion des résultats, on peut considérer que les étalements sont équivalents pour tous les BFUP qui présentent de fait un caractère autoplaçant, ce qui permettra de mettre en œuvre ces matériaux sans vibration. On peut toutefois noter que l'étalement est légèrement supérieur pour la formulation 880-1,5%-MK, qui présente un dosage moindre en fibres, ce qui peut s'expliquer par des frottements atténués par rapport aux autres formulations. Ceci est en accord avec la diminution de l'étalement des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires en présence de fibres observée par (Hughes et Fattuhi, 1976), (Rossi, 1992), (Grünewald, 2004), (Dhonde et al., 2007), et qui est accentuée lorsque la teneur en fibres augmente.

En ce qui concerne le temps d'écoulement, le premier temps mesuré T_{Lbox_1} de 3 secondes est identique pour tous les BFUP. En revanche, le second temps mesuré T_{Lbox_2} du BFUP avec fumée de silice est plus faible que celui des BFUP avec métakaolin. Ceci signifie que le BFUP contenant de la fumée de silice s'écoule plus rapidement que ceux avec métakaolin. Ce résultat confirme les tendances observées par (Rahman et al., 2014) sur le fait que la forme arrondie des grains de fumée de silice facilite l'écoulement par rapport à la

forme en plaquettes du métakaolin, augmentant ainsi la vitesse d'écoulement. Le temps d'écoulement T_{Lbox_2} maximal est obtenu avec la composition 880-2%-MK, qui contient les plus grandes teneurs en métakaolin et en fibres des trois formulations à base de métakaolin.

3.2.1.2. Mesures au rhéomètre

A partir des enregistrements du couple et de la vitesse de rotation appliquée en fonction du temps, nous pouvons construire les courbes d'écoulement. Les courbes d'écoulement de chaque BFUP à l'instant t_0 sont tracées et présentées sur la Figure 3 – 5.

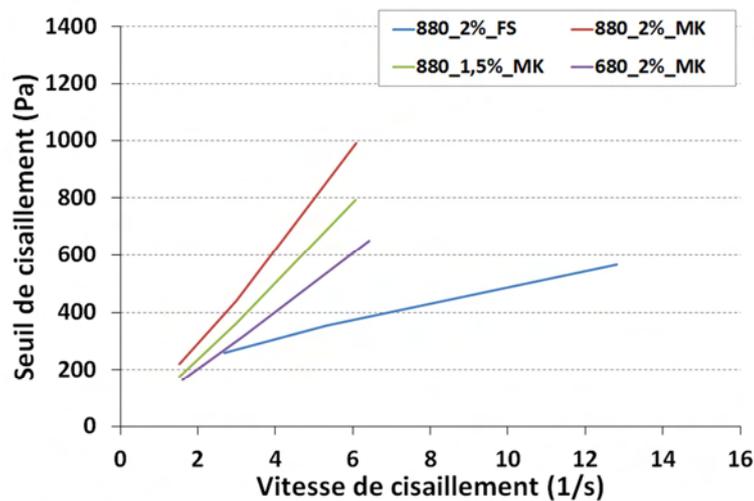


Figure 3 – 5 : Courbe d'écoulement de différents BFUP à t_0

Pour faciliter l'exploitation des résultats, nous supposons que dans les intervalles de gradients de vitesses testés de $2,5 \text{ s}^{-1}$ à 13 s^{-1} pour le béton avec fumée de silice et de $1,5 \text{ s}^{-1}$ à $6,7 \text{ s}^{-1}$ pour les bétons à base de métakaolin, ces bétons présentent un comportement Binghamien (valeurs des coefficients de corrélation de la loi de régression linéaire supérieurs à 0,95). Il est donc possible de déduire la viscosité plastique η_p qui est la pente de la droite passant par les points expérimentaux. Ces valeurs ont été déterminées à t_0 et sont présentées dans le Tableau 3 – 2 avec celles du seuil statique de cisaillement. Nous rappelons que le seuil statique de cisaillement correspond à la valeur maximale obtenue durant la première phase du rhéogramme (Figure 3 – 3) et traduit la contrainte à appliquer pour faire écouler un matériau initialement au repos.

Tableau 3 – 2 : Seuil statique de cisaillement et viscosité plastique à t_0

Composition	Seuil statique de cisaillement (τ_0) en Pa	Viscosité plastique (η_p) en Pa.s
880-2%-FS	188	30
880-2%-MK	182	169
880-1,5%-MK	76	136
680-2%-MK	107	101

Les seuils statiques de cisaillement obtenus à t_0 varient de 76 à 188 Pa. Bien que faibles, ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues par (Roussel et Cussigh, 2008) pour les bétons autoplaçants (48 à 70 Pa). Ceci peut être attribué au volume de pâte supérieur des BFUP, qui induit une plus forte capacité de structuration du matériau au repos (Roussel et al., 2012). La comparaison entre deux premières formules qui ont la même teneur en fibres et un volume de pâte quasiment équivalent montre des valeurs de seuil statique assez proches. Une réduction du seuil est notée pour la formule 680-2%-MK, qui comporte le volume de pâte le plus faible. La valeur minimale du seuil statique est obtenue pour la formule 880-1,5%-MK, ce qui peut être dû à la teneur inférieure en fibres, qui semble réduire la capacité de structuration.

Les valeurs des viscosités plastiques obtenues sont comprises entre 30 Pa.s et 169 Pa.s, et dépendent de la composition du mélange. Ces valeurs sont donc très inférieures à 300Pa.s au-delà de laquelle les bétons sont difficiles à manier, à vibrer, et à talocher et présentent souvent un bullage grossier au démoulage. Les BFUP avec métakaolin ont des valeurs de l'ordre de 100 à 200 Pa.s semblables à celles des BHP. (Cyr et Mouret, 2003) ont montré que la viscosité plastique devient élevée si une grande quantité de superplastifiant est utilisée comme très souvent pour des BHP. Or, pour nos BFUP de très faibles rapports E/L (de 0,17 à 0,21), un fort dosage en superplastifiant a été incorporé afin d'obtenir une bonne maniabilité. Néanmoins, nous pouvons considérer que les valeurs de viscosité plastique obtenues demeurent relativement modérées compte tenu du rapport E/L et du dosage en superplastifiant utilisés. Ceci peut être expliqué par deux aspects : l'utilisation d'un seul sable roulé comme granulat qui réduit les frottements ; le volume de fines important qui permet d'écarter les granulats les uns des autres, et par conséquent de limiter les frictions intergranulaires.

Par rapport aux résultats obtenus, nous pouvons identifier deux types d'écoulement distincts. Le BFUP contenant de la fumée de silice est caractérisé par une viscosité plastique significativement inférieure à celle des BFUP à base de métakaolin. Ces résultats montrent que le BFUP avec fumée de silice présente une meilleure aptitude à l'écoulement que les

BFUP contenant du métakaolin. Les mesures du temps d'écoulement à la mini-boîte en L confirment cette observation avec des temps d'écoulement plus faibles pour le 880-2%-FS.

3.2.2. Propriétés rhéologiques en fonction du temps de repos après le malaxage

3.2.2.1. Evolution des valeurs d'étalement au mini-cône et d'écoulement à la mini-boîte en L en fonction du temps de repos

Nous nous intéressons dans cette partie à l'étude de l'évolution des paramètres rhéologiques dans le temps, ceci afin de proposer des recommandations et des préconisations concernant la mise en œuvre des BFUP dans des conditions de production industrielle. Nous présentons tout d'abord sur la Figure 3 – 6 les valeurs d'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement au deuxième repère de la mini-boîte en L (T_{Lbox_2}) des BFUP étudiés après différents temps de repos.

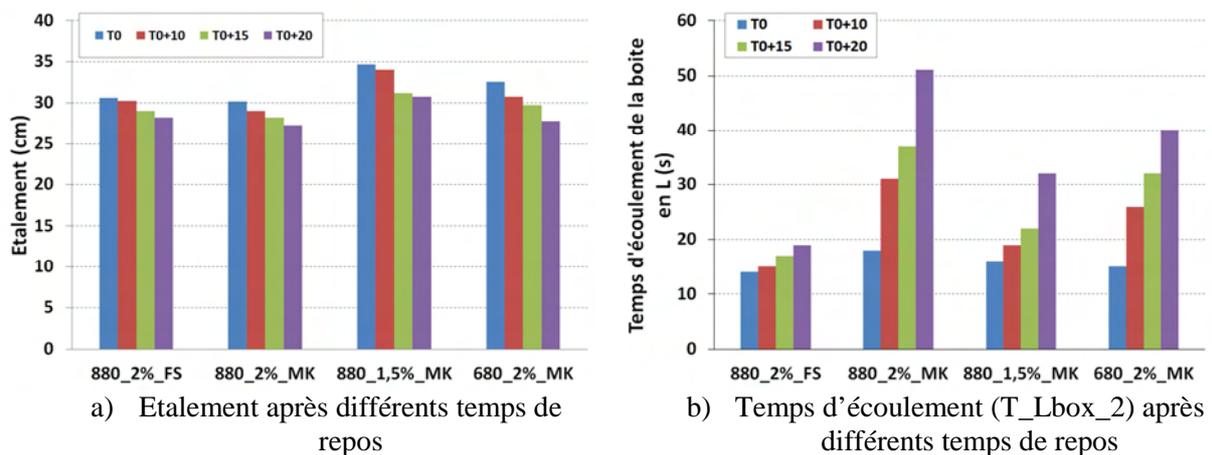


Figure 3 – 6 : Evolution de l'étalement et du temps d'écoulement en fonction du temps de repos

A partir de la Figure 3 – 6a, nous pouvons constater que, pour toutes les formulations, l'étalement diminue lorsque le temps de repos augmente, traduisant une perte de maniabilité dans le temps. Cette diminution peut être attribuée à la capacité de structuration du matériau au repos. Néanmoins, cette perte de maniabilité demeure faible durant les 20 minutes de repos qui suivent la fin du malaxage et ne remet pas en cause le caractère autoplaçant des matériaux.

Nous pouvons également constater que le temps d'écoulement à la mini-boîte en L augmente avec le temps de repos (Figure 3 – 6b) quel que soit le matériau. Si les valeurs de ces temps étaient assez proches pour toutes les formulations à l'instant t_0 de fin de malaxage, des écarts significatifs entre les BFUP apparaissent à partir de 10 minutes de repos. Ainsi, alors que l'augmentation des temps d'écoulement reste régulière et assez faible pour le BFUP

avec fumée de silice, la cinétique de l'évolution de ce paramètre est plus forte pour ceux avec métakaolin. Les temps d'écoulement sont ainsi de 51s, 31s et 40s pour les formules 880-2%-MK, 880-1,5%-MK et 680-2%-MK respectivement après un temps de repos de 20 minutes. Cette différence de comportement à l'écoulement au-delà de 10 minutes de temps de repos pourrait être attribuée à la capacité de structuration du matériau au repos et à une capacité résiduelle d'absorption d'eau par le métakaolin. L'augmentation plus modérée dans le cas du BFUP 880-1,5%-MK pourrait s'expliquer par le dosage inférieur en fibres, qui sont des éléments qui tendent, par frottement, à s'opposer à l'écoulement.

3.2.2.2. Evolution des données obtenues au rhéomètre en fonction du temps de repos

Les mesures au rhéomètre permettent de déterminer le seuil statique de cisaillement et la viscosité plastique. Pour étudier l'évolution des propriétés d'écoulement dans le temps, nous avons tracé les courbes d'écoulement de chaque BFUP sur la Figure 3 – 7.

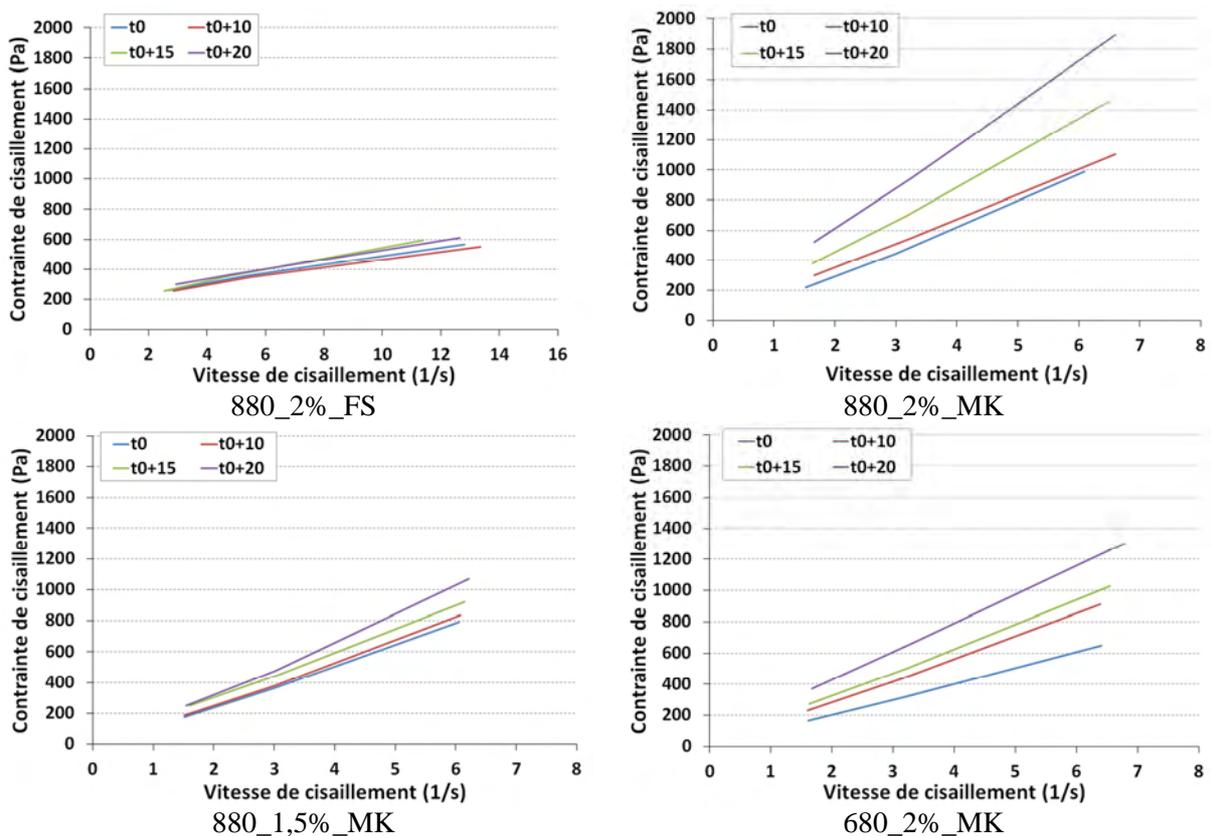


Figure 3 – 7 : Courbes d'écoulement des BFUP étudiés après différents temps de repos

L'analyse globale de la Figure 3-8 montre que, quel que soit le temps de repos, le comportement des BFUP demeure de type Binghamien. Nous pouvons observer que les courbes d'écoulement du BFUP incorporant de la fumée de silice 880-2%-FS ne sont

quasiment pas affectées par le temps de repos dans la plage étudiée de 10 à 20 minutes après la fin de malaxage. En revanche, les BFUP avec métakaolin ont un comportement qui évolue significativement avec le temps de repos. Celui avec 1,5% de fibres conserve des courbes d'écoulement assez proches, résultat que l'on peut relier à la quantité inférieure de fibres de cette formulation. Par contre, la formulation 880-2%-MK présente la variation la plus forte, à relier au plus fort dosage en liant, en métakaolin et en fibres. Ces résultats sont concordants avec ceux obtenus au mini-cône et à la mini-boite en L, ce qui traduit une corrélation entre ces grandeurs.

Nous sommes appuyés sur l'hypothèse que tous les BFUP présentent un comportement Binghamien dans la plage des valeurs de vitesse de cisaillement étudiée. Les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité plastique peuvent donc être calculées pour chaque temps de repos.

La Figure 3 - 8 présente l'évolution du seuil statique et de la viscosité plastique en fonction du temps de repos.

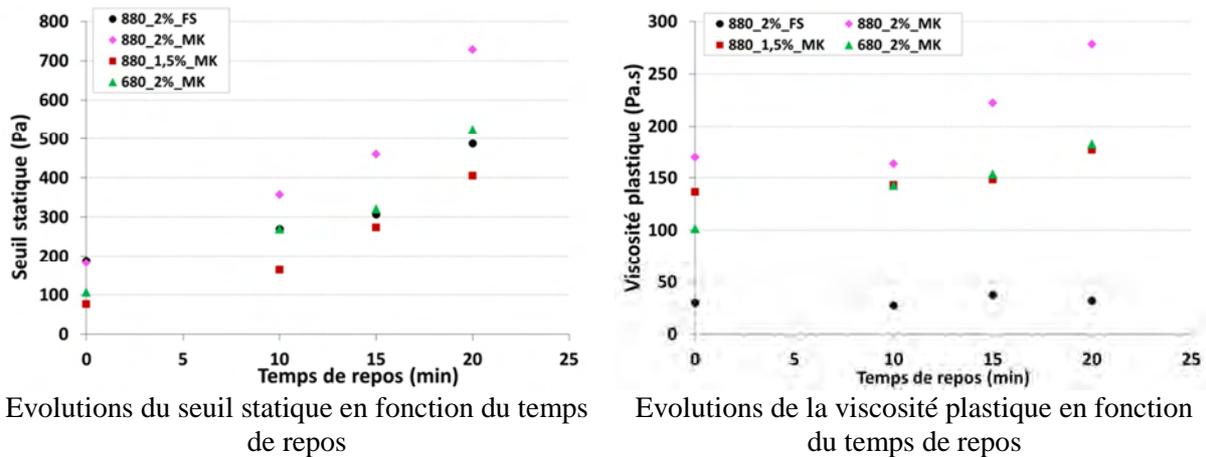


Figure 3 - 8 : Evolutions du seuil statique et de viscosité pastique en fonction du temps de repos

Globalement, pour toutes les formules testées, les seuils statiques de cisaillement augmentent avec le temps de repos. Ceci traduit la capacité de structuration lorsque les bétons sont au repos, et par conséquent, la perte de maniabilité dans le temps. Ces données sont concordantes avec les mesures d'étalement présentées précédemment. La confrontation entre les BFUP montre que la formule 880-2%-MK présente les seuils statiques les plus élevés quel que soit le temps de repos. Nous pouvons relever une cinétique plus forte du seuil de cette formule à partir de 15 minutes de repos, avec une valeur de seuil statique de 727 Pa après 20 minutes de repos. La cinétique d'évolution du seuil statique des autres formules est semblable,

mais avec des amplitudes légèrement différentes (variant de 405 à 523 Pa après 20 minutes de repos). La plus faible évolution à cette échéance a été obtenue pour la formule 880-1,5%-MK, qui contient moins de fibres.

En ce qui concerne les valeurs de viscosité plastique, nous pouvons observer que celle du BFUP avec la fumée de silice évolue peu avec le temps de repos, contrairement à celles des BFUP qui incorporent du métakaolin. De plus, elle est significativement inférieure à celles des BFUP à base de métakaolin quel que soit le temps de repos. Ces résultats confirment ceux des mesures du temps d'écoulement à la mini-boîte en L analysées précédemment, ce qui semble révéler une corrélation entre ces données dynamiques d'ouvrabilité. Ces effets peuvent être attribués à la différence de forme entre les particules de métakaolin et celles de fumée de silice. (Rahman et al., 2014) ont montré que les propriétés rhéologiques des bétons sont améliorées lors de l'utilisation de fumée de silice en raison de sa forme régulière et ronde qui atténue les frottements entre ses grains. La forme irrégulière de type plaquette du métakaolin peut, quant à elle, expliquer les fortes amplitudes de la viscosité plastique du fait de frottements plus importants entre ses particules (Cyr et Mouret, 2003). Cette explication est confirmée par l'analyse de 30000 grains de métakaolin par le moyen d'un microscope optique équipé d'un système de caractérisation de particules automatisé. En effet, le rapport d'aspect qui correspond au rapport largeur sur longueur de particules de métakaolin est égal à $0,72 \pm 0,02$, ce qui indique que les grains de métakaolin sont de forme allongée par rapport aux particules de fumée de silice considérées comme parfaitement sphériques (rapport d'aspect de moins de 1 dans le second cas) (Cyr et Mouret, 2003).

La comparaison des viscosités plastiques des compositions à base de métakaolin montre que les fractions volumiques de métakaolin et de fibres peuvent influencer l'évolution de la viscosité plastique. En effet, la composition 880-2%-MK contenant des quantités plus importantes en métakaolin et en fibres présente la viscosité plastique la plus élevée. En terme de cinétique, les viscosités plastiques de toutes les formulations à base de métakaolin évoluent peu entre 0 et 10 minutes de temps de repos. En revanche, au-delà, le 880-2%-MK développe la cinétique la plus intense par rapport aux autres compositions avec métakaolin avec moins de fibres 880-1,5%-MK ou avec moins de liant 680-2%-MK.

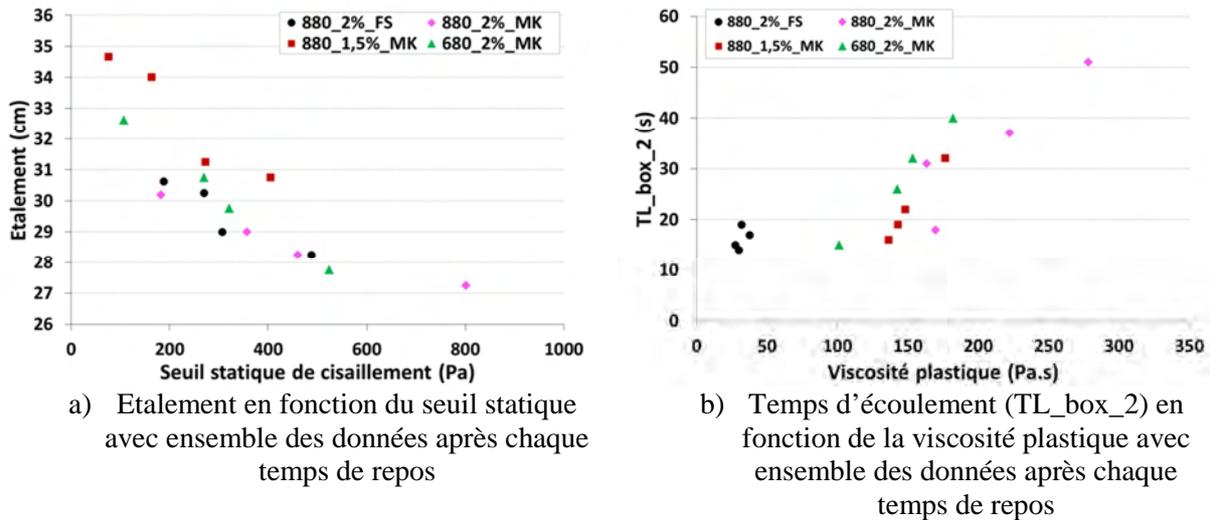


Figure 3 – 9 : Evolution des mesures d'étalement et de temps d'écoulement en fonction respectivement du seuil statique de cisaillement et de la viscosité plastique

Sur la base des données expérimentales et pour l'ensemble des BFUP étudiés, nous pouvons constater sur la Figure 3 – 9a une diminution des valeurs d'étalement en fonction du seuil statique de cisaillement. (Roussel, 2006b) avait mis en évidence que la perte de maniabilité dans le temps, révélée par les diminutions d'étalement, est corrélée à l'augmentation avec le temps de repos de la contrainte de cisaillement nécessaire pour faire s'écouler le matériau. La Figure 3 – 9b montre une relation croissante quasi linéaire entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement $T_{L_{box_2}}$. Elle confirme aussi que le comportement dynamique des BFUP avec métakaolin est différent de celui avec fumée de silice.

3.2.2.3. Investigation de la thixotropie des BFUP étudiés

Lorsqu'un béton est au repos, il est sujet à deux phénomènes. Le premier phénomène est consécutif à l'évolution du matériau due aux réactions d'hydratation qui sont évidemment irréversibles. Dans notre cas, nous avons effectué les mesures pendant une période de 30 minutes à partir du moment où l'eau et le ciment sont en contact. Par conséquent, les phénomènes d'hydratation peuvent être négligés (Roussel, 2008). Le deuxième est la structuration induite par la thixotropie. La thixotropie caractérise le comportement d'un matériau qui, lorsqu'une contrainte de cisaillement est appliquée puis maintenue fixe après un long temps de repos, voit sa viscosité apparente décroître avec la durée de l'écoulement. Puis le matériau retrouve son état initial. Selon (Roussel et al., 2012), les matériaux cimentaires sont plus ou moins thixotropes selon leur composition. L'origine de la thixotropie est liée à la nature colloïdale des matériaux cimentaires, et plus particulièrement des particules les plus

fines (ciment, additions, fines du sable), et ce caractère varie en fonction de leur nature et dosage. Le phénomène de thixotropie peut entraîner la formation d'interfaces de moindre résistance entre deux couches coulées à des intervalles de temps excessifs. Son étude dans le cas de nos matériaux est donc indispensable vis-à-vis de potentielles reprises de bétonnage.

Il y a deux façons d'évaluer la thixotropie : la première consiste à mesurer la capacité de déstructuration sous une vitesse de cisaillement constante ; la deuxième, utilisée dans notre cas, consiste à mesurer le seuil statique de cisaillement de béton à différents temps de repos. La thixotropie qui caractérise la structuration du matériau au repos, est évaluée par l'intermédiaire du paramètre A_{thix} qui correspond à la pente de la relation du seuil statique en fonction du temps de repos dont les points expérimentaux de l'ensemble des BFUP sont présentés sur la Figure 3 – 10. Précisons que le mélange granulaire n'a subi aucune sollicitation autre que son malaxage, il peut donc être considéré comme une suspension initialement structurée.

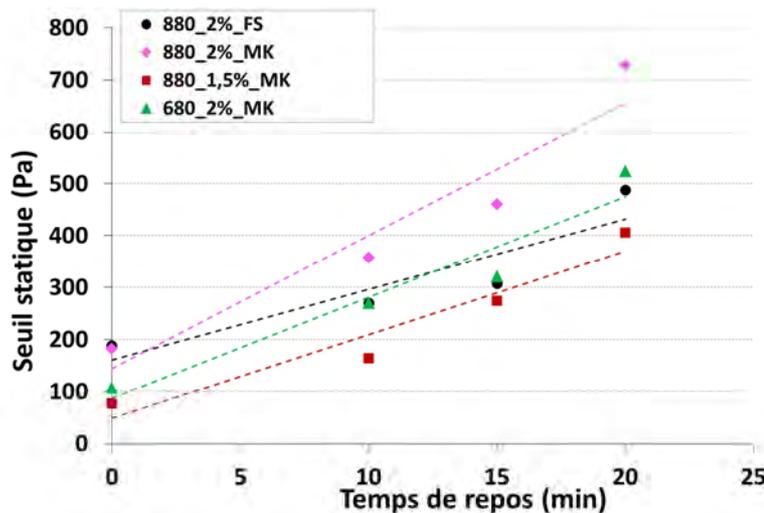


Figure 3 – 10 : Evolution du seuil statique de cisaillement en fonction du temps de repos

Nous pouvons constater, d'après la Figure 3 – 10, que le seuil statique de cisaillement augmente quasiment linéairement jusqu'à 15 minutes de temps de repos, puis augmente significativement au-delà. Il est donc possible de déduire le coefficient directeur de la régression linéaire qui correspond au coefficient de structuration noté A_{thix} , qui caractérise la thixotropie selon (Roussel, 2006a). Ce calcul s'appuie sur l'hypothèse que le comportement rhéologique des matériaux étudiés est de type Binghamien dans la plage de gradient de vitesse de cisaillement étudié.

La capacité de structuration A_{thix} de chaque béton est présentée dans le Tableau 3 – 3, auquel nous avons ajouté la classification proposée par (Roussel, 2006a).

Tableau 3 – 3 : Valeurs du paramètre de thixotropie A_{thix} et classification du caractère thixotropique des BFUP étudiés

Béton	Thixotropie A_{thix} (Pa/s)	Classification (Roussel, 2006a)	
880-2%-FS	0,23	Entre 0,1 et 0,5	Thixotrope
880-2%-MK	0,43		
880-1,5%-MK	0,27		
680-2%-MK	0,32		

D'après les résultats du Tableau 3 – 3, tous les BFUP sont thixotropes. Nous pouvons constater que le BFUP formulé avec la fumée de silice est le moins thixotrope en comparaison aux BFUP qui incorporent du métakaolin. Ces comportements sensiblement différents sont vraisemblablement liés à la composition de mélange, à la nature et au dosage des constituants et aux interactions inter-particulaires. En effet, les travaux de (Ahari et al., 2015) ont montré que la nature de l'addition minérale et son interaction avec les autres fines présentes dans le mélange jouent un rôle sur la restructuration du béton. Ils ont montré que l'utilisation du métakaolin dans la formulation de bétons autoplaçants accentue la thixotropie et que cet effet dépend du taux de substitution du ciment par cette ultrafine. Dans cette étude, une forte thixotropie a notamment été observée pour un béton autoplaçant qui incorpore 36% de métakaolin par rapport à la masse totale de liant. Dans notre cas, le BFUP le plus thixotrope est celui qui contient les quantités de métakaolin et de fibres métalliques les plus importantes, noté 880-2%-MK. La plus forte thixotropie de ce matériau peut être expliquée par les interactions particulières qui sont fonctions de la forme des grains et de leur quantité. En effet, les particules de métakaolin sont de type plaquettes, et de forme allongée et angulaire, et sont susceptibles de développer des liaisons inter-particulaires au repos qui piègent une quantité importante d'eau et de superplastifiant. Par conséquent, plus le temps de repos augmente, et plus les liaisons inter-particulaires deviennent nombreuses et solides accroissant ainsi le seuil statique de cisaillement. Les fibres métalliques, quant à elles, agissent comme un facteur d'amélioration de la liaison inter-particulaire et donc d'accumulation structurelle par effet de congestion. Le couplage de ces deux effets peut être à l'origine de la thixotropie plus importante du mélange 880-2%-MK.

3.3. Impact de la thixotropie sur le process de production industrielle

Le phénomène de thixotropie des bétons autoplaçants est bien connu. (Saak et al., 2001), (Assaad et al., 2003) et (Billberg, 2003) ont montré que la thixotropie peut présenter des avantages dans le cas des bétons autoplaçants comme la réduction de la poussée exercée sur les coffrages et la réduction de la ségrégation statique après leur mise en place. (Roussel, 2006a) a néanmoins relevé un inconvénient majeur de la thixotropie, qui est le risque d'hétérogénéité en cas de coulage multicouches. En effet, durant la mise en place, si la couche de béton inférieure se restructure rapidement avant la mise en place d'une deuxième couche supérieure, les deux couches peuvent alors ne pas se mélanger et créer une interface constituant une zone perméable de moindre résistance.

Dans la fabrication de BFUP à l'échelle industrielle, le volume de béton fabriqué est réduit à la moitié de la capacité du malaxeur comme nous avons pu le tester. Ceci signifie qu'il est nécessaire dans certains cas de réaliser un coulage en multicouches pour des pièces volumineuses. A cette problématique s'ajoute des temps de malaxage plus longs que pour des bétons ordinaires. Face à ces contraintes de production et compte tenu du caractère thixotrope des BFUP de notre étude, il est donc indispensable d'évaluer le temps critique entre deux bétonnages afin d'éviter les impacts sur les performances mécaniques et de durabilité des éléments fabriqués.

(Roussel et Cussigh, 2008) ont montré qu'il est possible de déterminer le temps critique entre deux bétonnages à partir du coefficient A_{thix} selon l'équation (3 – 6) :

$$T_c = \frac{\rho g h}{3.5 A_{thix}} \quad (3 - 6)$$

Où :

- T_c est le temps critique à respecter entre deux coulages (secondes) ;
- A_{thix} est l'indicateur de thixotropie (Pa/s) ;
- h est la hauteur de la deuxième couche de béton (m) ;
- ρ est la masse volumique de béton (kg/m^3)
- g est la constante de l'accélération de la pesanteur égale à 9,81 (m/s^2)

Cette équation est valable si le comportement rhéologique du matériau est de type Binghamien et que la hauteur de la deuxième couche de béton est supérieure à 10 cm. Les applications visées en BFUP sont en général des structures de faible épaisseur. Nous avons néanmoins décidé de déterminer les valeurs de ce temps critique à titre informatif de manière à permettre à l'industriel de constituer une base de données et d'informations sur le comportement thixotrope des formulations de BFUP développées. Le temps critique a été calculé pour chaque formulation et présenté dans le Tableau 3 - 4.

Tableau 3 - 4 : Temps critique à ne pas dépasser entre les bétonnages des BFUP étudiés

Béton	Thixotropie A_{thix} (Pa/s)	Classification	Temps critique (T_c) en minutes
880-2%-FS	0,23	Thixotrope	49
880-2%-MK	0,43		26
880-1,5%-MK	0,27		41
680-2%-MK	0,32		34

Le temps critique diminue lorsque la thixotropie augmente. Par conséquent, le BFUP incorporant la fumée de silice présente le temps critique le plus élevé (49 minutes) par rapport à ceux à base de métakaolin. La plus forte thixotropie est obtenue avec la formule 880-2%-MK, induisant le plus faible temps critique de 26 minutes. Ce délai est légèrement plus court par rapport au temps total d'un cycle de fabrication d'une pièce in situ, comme le montre le Tableau 3 – 5.

Tableau 3 – 5 : Temps total d'un cycle de bétonnage d'un élément de préfabrication

Actions	Temps (minutes)
Pesée des matériaux	3
Malaxage à sec	2
Malaxage humide	8
Malaxage humide avec fibres	2
Vidange	1
Transport du seau jusqu'à la pièce à couler	2
Bétonnage	7-10
Temps de fabrication et approvisionnement	15-18
Temps total maximal	28

Le temps total maximal de fabrication est de 28 minutes et le temps hors bétonnage est de 18 minutes. Afin d'éviter les conséquences de la thixotropie dans le cas d'un bétonnage en multicouches, 2 méthodes peuvent être appliquées pour éviter une reprise de bétonnage. La première consisterait à laisser le béton de la première gâchée dans le seau en attendant le

malaxage de la deuxième gâchée. Le temps de malaxage étant de 12 minutes, lorsque la deuxième gâchée est vidangée, les deux bétons se mélangent bien dans le seau sous le poids propre du nouveau béton, qui peut être assimilé à une contrainte de cisaillement qui peut casser facilement la surface de l'ancien béton qui s'est structurée par thixotropie. Une deuxième méthode consisterait à enchaîner le malaxage de la gâchée suivante dès la vidange dans le seau de la gâchée précédente. Pendant la phase de transfert du seau vers la pièce et de bétonnage qui dure 9 à 11 minutes, le malaxage se déroule pendant environ 12 à 15 minutes si l'on tient compte de la pesée des matériaux. Néanmoins, une dessiccation de surface, non étudiée dans les études rhéologiques grâce aux précautions du dispositif d'essai qui la limite, peut être non négligeable dans le hall de préfabrication de l'usine et entraîner une rigidification de la couche supérieure accentuant l'effet de reprise de bétonnage. Une autre méthode consisterait enfin à casser mécaniquement la surface de la première couche de béton coulé par un procédé mécanique (type râteau) ou avec une aiguille vibrante avant de verser la deuxième couche. Toutefois, l'utilisation de l'aiguille vibrante n'est pas conseillée dans le cas des BFUP en raison des perturbations générées dans l'orientation des fibres, qui peut impacter défavorablement ses propriétés, en particulier le comportement en traction des éléments préfabriqués.

CONCLUSIONS

Le comportement à l'état frais des quatre formulations de BFUP établies dans le chapitre 2 a été investigué dans ce chapitre. Dans l'optique de proposer des préconisations et des bonnes pratiques de production et de mise en œuvre de ces nouveaux matériaux en usine de préfabrication, il était primordial d'étudier les paramètres rhéologiques à l'état frais, dès la fin du malaxage, et leurs évolutions dans le temps.

La caractérisation à l'état frais a été réalisée au moyen des essais classiques tels que l'étalement au mini-cône et l'écoulement à la mini-boîte en L. Des mesures ont également été effectuées au rhéomètre à béton afin de caractériser plus finement les propriétés à l'état frais, de déterminer les évolutions de l'aptitude à l'écoulement et les effets de structuration dans le temps grâce à l'analyse des seuils statiques de cisaillement et des viscosités plastiques. Ces essais ont ainsi été réalisés immédiatement à la fin de malaxage et après différents temps de repos pour les quatre formulations de BFUP.

Tous les BFUP de notre étude peuvent être considérés comme autoplaçants. En effet, les valeurs d'étalement au mini cône à la fin de malaxage sont comprises entre 30 et 34 cm, ce qui est conforme aux indications de (Wille et al., 2012). Les temps d'écoulement à la mini-boîte en L (T_Lbox_2) relevés pour les quatre BFUP montrent que la formulation avec fumée de silice comporte un temps d'écoulement plus faible que celui des BFUP qui incorporent du métakaolin. Ceci est lié probablement à la différence de morphologie entre les grains de fumée de silice, sphériques, et de métakaolin, sous forme de plaquettes. Les mesures au rhéomètre à la fin du malaxage ont mis en évidence un comportement de type Binghamien dans la plage des gradients de vitesses étudiés, comme attendu. Les résultats des essais au rhéomètre dès la fin du malaxage ont montré que les BFUP à base de métakaolin sont caractérisés par une viscosité relativement élevée par rapport à la formule avec fumée de silice, pour la même raison de la forme en plaquette irrégulière de cette fine. Les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK, de volume de pâte et de fibres quasiment comparables, présentent un seuil statique (contrainte de cisaillement nécessaire pour faire s'écouler le matériau au repos) très proche. Une réduction de la valeur de ce seuil a été constatée pour la formule 680-2%-MK, qui contient le plus faible volume de pâte, et pour 880-1,5%-MK, valeur minimale du seuil, qui est la moins dosée en fibres, démontrant l'influence de ces deux paramètres de formulations sur les propriétés rhéologiques.

Les mesures de l'étalement au mini cône, de l'écoulement à la mini-boîte en L, et celles au rhéomètre, après différents temps de repos, ont permis d'étudier l'évolution des grandeurs rhéologiques en fonction du temps. Les résultats montrent une augmentation de tous les paramètres avec le temps de repos, sauf pour la viscosité plastique de la formulation à base de fumée de silice. Cette différence de comportement traduit une restructuration supérieure pour les BFUP avec métakaolin qui affecte leur aptitude à l'écoulement dans le temps. Elle pourrait s'expliquer encore une fois par la morphologie distincte des deux ultrafines, avec la forme régulière et ronde des particules de fumée de silice plus favorables à l'écoulement que celle irrégulière de type plaquettes du métakaolin qui augmente les frottements entre ses grains. Elle pourrait être également induite par une absorption d'eau différée du métakaolin.

L'investigation de la thixotropie a permis de montrer que toutes les formulations de BFUP de notre étude étaient thixotropes selon la classification proposée par (Roussel, 2006a). Celles à base de métakaolin présentent une thixotropie supérieure à celle du BFUP avec la fumée de silice, vraisemblablement pour les mêmes raisons qu'avancées pour les autres résultats

rhéologiques à savoir la forme des grains. Le mélange le plus thixotrope est 880-2%-MK qui contient le plus de pâte et de fibres.

A partir du coefficient A_{thix} , nous avons déterminé le temps critique, qui représente le délai maximal entre deux couches de béton lors du coulage de pièces de structure de grand volume au-delà duquel le béton ne se mélange pas correctement, créant le risque d'une interface de reprise de bétonnage qui peut affecter localement les propriétés mécaniques et de transfert. Les résultats ont montré que la formule 880-2%-MK, la plus thixotrope, présente évidemment le temps critique le plus court (26 minutes). Par rapport au temps estimé nécessaire pour la séquence de malaxage, environ 15 minutes, pesée des matériaux comprise, et au temps total maximal en tenant compte de la vidange du malaxeur, du transport du seau et du bétonnage de la pièce, soit autour de 28 minutes, le risque de créer une interface singulière est réel. Des solutions pratiques ont donc été proposées.

L'étape de caractérisation à l'état frais des formules de BFUP établies dans le chapitre 2 étant réalisée, nous pouvons désormais entamer la caractérisation à l'état durci de ces BFUP afin notamment de les situer de manière réglementaire selon les prénormes matériaux BFUP (PR NF P18-470) et calculs des structures (PR NF P18-710). Ce sera l'objet du chapitre 4.

CHAPITRE 4 : COMPORTEMENT A L'ETAT DURCI

INTRODUCTION

Ce chapitre traite de l'étude des propriétés mécaniques à l'état durci des quatre formulations de BFUP établies et caractérisées à l'état frais, respectivement dans les chapitres 2 et 3. L'objectif est de caractériser le comportement à l'état durci de ces BFUP et de les classer réglementairement vis-à-vis de la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470). Les propriétés mécaniques des BFUP à base de métakaolin seront comparées à celles obtenues pour la formulation de référence avec fumée de silice afin de justifier la pertinence de la substitution proposée dans la confection des BFUP. L'influence des paramètres de formulations (quantité de pâte et dosage en fibres métalliques) sera également analysée à partir de la confrontation des résultats des trois BFUP avec métakaolin. Nous rappelons que les BFUP formulés ne subissent aucun traitement thermique, ce qui les distingue de certains existants sur le marché actuel. Ce choix a été adopté pour répondre au cahier de charges concernant la réduction du coût de production et de l'impact environnemental établi lors de démarrage de ce projet.

Ce chapitre est composé de 2 parties.

La première est consacrée à la présentation des matériels et méthodes utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques. Dans cette partie, nous ne décrivons pas à nouveau les procédures des essais les plus classiques, comme les résistances en compression et flexion 3 points sur éprouvettes 4x4x16 cm, expliqués dans l'étude préliminaire du chapitre 2.

La deuxième partie détaille les résultats obtenus en distinguant les propriétés mécaniques instantanées et différées. La confrontation des comportements mécaniques instantanés des quatre formulations de BFUP étudiées permettra d'évaluer l'influence des paramètres de formulation (nature de l'addition, teneurs en liant et en fibres). Il en sera de même en ce qui concerne l'étude des déformations différées libres de retrait. Pour les déformations de fluage en compression uniaxiale, nous avons limité l'étude à la formulation de référence à base de fumée de silice et à celle quasiment équivalente incorporant le métakaolin, l'objectif étant d'étudier l'influence du type d'addition sur ce comportement à long terme.

4.1. Matériels et méthodes

Nous allons présenter l'ensemble des protocoles des essais expérimentaux utilisés au cours de ce projet pour caractériser mécaniquement nos matériaux. Dans un premier temps, nous rappellerons la procédure de fabrication des BFUP, puis détaillerons les mesures effectuées immédiatement après le cycle de malaxage, la fabrication des éprouvettes et la conservation de ces dernières. Puis, en complément des essais de caractérisation déjà présentés, nous décrirons dans un deuxième temps les protocoles d'essais à l'état durci.

4.1.1. Fabrication et mesures effectuées à l'état frais

Durant cette étude, toutes les formulations étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec les mêmes matériels, les mêmes géométries des moules et les mêmes conditions de conservation. Le malaxeur utilisé est de type train-valseur à axe vertical de capacité 200 litres. Le volume de béton fabriqué était de 120 litres. La procédure de malaxage est la même que celle établie durant le chapitre 2.

Le temps total de malaxage du BFUP contenant de la fumée de silice est de 10 minutes, il est de 12 minutes pour les BFUP qui incorporent du métakaolin. Comme proposé précédemment, ceci peut être lié à la forme arrondie des grains de fumée de silice qui réduit les frottements et favorise leur dispersion plus rapide dans l'eau et l'adjuvant. Le temps de malaxage est relativement plus long que celui des bétons ordinaires (au maximum de 5 minutes).

Dès la fin du malaxage, les mesures d'étalement au mini cône, de teneur en air occlus et de masse volumique ont été effectuées. La mesure d'étalement a pour l'objectif de contrôler l'ouvrabilité des bétons, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3. Nous nous assurerons que cette valeur est supérieure ou égale à 30 cm, valeur conseillée par (Wille et al., 2012). La mesure de la masse volumique permet de corriger éventuellement les proportions des mélanges confectionnés. L'essai de l'air occlus nous donne les informations concernant la teneur en air des bétons. Ces essais simples à l'état frais nous permettent de vérifier aussi la reproductibilité de ces formulations.

➤ Mesures de la masse volumique et de l'air occlus

Les mesures de la masse volumique et de l'air occlus des bétons ont été réalisées conformément aux normes (NF EN 12350-7, 2012) et (NF EN 12350-6, 2012)

respectivement. Un aéromètre de 8L de capacité est utilisé pour les mesures de l'air occlus. Cette mesure consiste à appliquer à un volume connu de béton une pression donnée qui va comprimer le volume d'air occlus (loi de Mariotte). La teneur en air du béton est lue directement sur l'affichage gradué de l'aéromètre. L'air occlus correspond au volume d'air entraîné au sein du matériau lors de la phase de malaxage et qui peut rester piégé dans le béton. Il dépend essentiellement des paramètres liés à la formulation (type de granulats, de superplastifiant, etc.).

➤ **Mise en œuvre et conservation des éprouvettes**

Différents types d'éprouvettes ont été confectionnés comme indiqué dans le Tableau 4 - 1 pour les essais de caractérisation à l'état durci détaillés dans la suite de ce document.

Tableau 4 - 1: Programme expérimental pour la caractérisation des propriétés mécaniques

Essais réalisés	Type d'éprouvette	Nombre d'éprouvette par échéance	Conservation	Echéances (jours)
Compression/Module d'élasticité	φ11x22 cm	4 à 1, 7, 90 jours et 6 à 28 jours	Humide	1, 7, 28 et 90
Détermination de la relation (σ-ε) en compression	φ11x22cm	5		28
Flexion 3 et 4 points	Prismes 7x7x28 cm	3 en flexion 4 points et 5 en flexion 3 points		40
Retrait	φ11x22cm	6	Endogène ou dessiccation	démarrage à 1 ou 2 jours
Fluage	φ11x22cm	6	Endogène puis endogène ou dessiccation pendant l'essai	démarrage à 29 jours

La mise en place des BFUP dans les moules est simple puisque les mélanges présentent un caractère autoplaçant. Pour toutes les éprouvettes prismatiques confectionnées, le béton est versé en continu dans le sens de la longueur du moule comme l'illustre la Figure 4 - 1 pour favoriser l'orientation des fibres suivant l'axe longitudinal. Ceci permet ainsi d'améliorer la résistance en flexion. Les hauteurs de chute étaient inférieures à 0,5 m conformément aux recommandations de (AFGC, 2013).

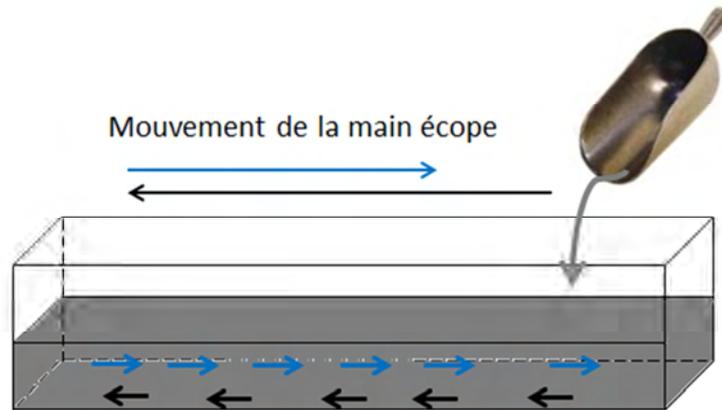


Figure 4 - 1 : Mode de coulage

Les moules sont ensuite recouverts par un film plastique pour empêcher le départ de l'eau libre par évaporation. Ils sont ensuite conservés dans une salle humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\% \text{HR}$ pendant 24 heures. Le démoulage est fait à 24 heures, puis les éprouvettes sont conditionnées selon le mode défini dans le Tableau 4 - 1 jusqu'à l'échéance d'essai.

4.1.3. Mesure des propriétés mécaniques

4.1.3.1. Mesure des propriétés mécaniques instantanées

Les paramètres caractérisant les comportements en compression (résistance, module d'élasticité, coefficient de Poisson et loi de comportement) et en traction (traction par flexion, traction directe et loi de comportement) ont été étudiés.

4.1.3.1.1. Caractérisation du comportement en compression

- Détermination des résistances et de la loi de comportement en compression

Les éprouvettes testées en compression sont cylindriques, de dimensions $\phi 11 \times h 22$ cm et sont rectifiées avant les essais. La plus petite dimension ϕ des éprouvettes respecte la condition suivante (AFGC, 2013), (PR NF P18-470) : $\phi \geq 5 l_f$ ou $\phi \geq 6 D_{\text{max}}$ avec l_f la longueur des fibres et D_{max} la dimension du plus gros granulats.

La détermination de la résistance en compression est effectuée conformément à la norme (NF EN 12390-3, 2012), sur une presse pilotée en force conformément à la norme (NF P18-411, 1981). La vitesse de mise en charge est constante et égale à $0,5 \text{ MPa/s}$ jusqu'à la rupture. La détermination de la résistance moyenne f_{cm} est obtenue en faisant la moyenne d'un

minimum de trois éprouvettes. La détermination de la résistance caractéristique f_{ck} est obtenue selon la relation suivante (AFGC, 2013) :

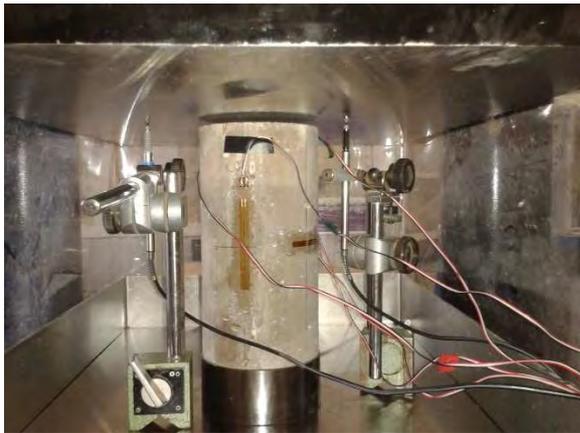
$$\text{Valeur caractéristique} = \text{valeur moyenne} - \text{coefficient de Student} \times \text{écart type}$$

Le coefficient de Student dépend du nombre d'essais expérimentaux réalisés. Ses valeurs sont récapitulées dans le Tableau 4 - 2.

Tableau 4 - 2: Valeur du coefficient de Student pour le calcul de la résistance caractéristique en compression

Nombre de résultats expérimentaux	Coefficient de Student
3	2,920
4	2,353
5	2,132
6	2,015
7	1,943
8	1,895
9	1,860
10	1,833

La caractérisation de la loi de comportement σ - ε en compression permet notamment de mettre en évidence l'action des fibres métalliques dans la phase post-pic. La procédure de l'essai est basée sur celle de l'étude de (Hassan et al, 2012). Les essais ont été effectués sur les mêmes types d'éprouvettes cylindriques, de 11 cm de diamètre et de 22 cm de hauteur, que celles utilisées pour la mesure de la résistance en compression. Le test est asservi en déplacement du vérin de la presse par l'intermédiaire d'un capteur de déplacement LVDT avec une vitesse de chargement de 1 $\mu\text{m/s}$. Les éprouvettes sont instrumentées de trois jauges de déformation orientées suivant l'axe du chargement et espacées de 120°, permettant l'enregistrement des déformations longitudinales pendant la phase élastique linéaire. Lorsque la force maximale est atteinte, les jauges sont endommagées du fait d'une forte microfissuration en surface. Afin de pouvoir suivre les déformations longitudinales post-fissuration, deux capteurs externes type LVDT sont fixés au préalable entre les deux plateaux de la presse. La Figure 4 - 2 présente le dispositif de l'essai.



a) Avant la rupture



b) Après la rupture

Figure 4 - 2: Dispositif d'essai pour la détermination du comportement en compression

Grâce à ce dispositif expérimental, la loi de comportement σ - ε en compression pourra être déterminée.

- Détermination du module d'élasticité longitudinal et du coefficient de Poisson en compression

Nous avons effectué les mesures du module d'élasticité en compression sur des éprouvettes cylindriques conformément aux recommandations (RILEM, 1972). Il est nécessaire de déterminer au préalable la résistance moyenne f_{cm} du béton.

Les éprouvettes sont instrumentées d'une cage extensométrique J2P, comme le montre la Figure 4 - 2, munie de 3 capteurs de déplacement longitudinaux espacés régulièrement selon un angle de 120° , et de 3 autres capteurs de déplacement espacés de 120° positionnés suivant la direction radiale de l'éprouvette pour mesurer la déformation radiale et en déduire le coefficient de Poisson.



Figure 4 - 3: Cage extensométrique pour la détermination de module d'élasticité et du coefficient de Poisson

Cet équipement est relié à une chaîne d'acquisition permettant d'enregistrer les déplacements et donc les déformations en fonction de la contrainte. L'essai consiste à effectuer 10 cycles de charge et de décharge avec palier de maintien. La vitesse de chargement et de déchargement est de 0,5 MPa/s. L'intensité de la charge appliquée est de 30% de la résistance moyenne en compression f_{cm} . Les mesures ont été réalisées sur les éprouvettes cylindriques rectifiées de 11 cm de diamètre et de 22 cm de hauteur.

Le module d'élasticité est calculé selon l'équation (4 - 1) et correspond au rapport entre la différence de la contrainte du dernier palier haut et celle du dernier palier bas et la différence des déformations correspondantes.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = (\sigma_a - \sigma_b) / (\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n}) \quad (4 - 1)$$

Où :

- σ_a est la contrainte du palier haut (30% de la contrainte à rupture) en MPa
- σ_b est la contrainte du palier bas égale à 0,5 MPa
- $\varepsilon_{a,n}$ est la déformation mesurée pour la contrainte σ_a pour le dernier cycle n
- $\varepsilon_{b,n}$ est la déformation mesurée pour la contrainte σ_b pour le dernier cycle n

Le coefficient de Poisson correspond au rapport entre la déformation moyenne transversale et la déformation moyenne longitudinale. Il est calculé à partir des mesures lors du dernier cycle, par l'intermédiaire de l'équation (4 - 2).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_l} \quad (4 - 2)$$

Où :

- ν est le coefficient de Poisson
- ε_r est la déformation moyenne radiale
- ε_l est la déformation moyenne longitudinale

Les valeurs expérimentales des modules sont ensuite comparées aux valeurs calculées selon le modèle (Eurocode 2, 2005) à partir des résistances moyennes en compression selon la formule (4 - 3).

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (4 - 3)$$

Où :

- E_{cm} est le module d'élasticité instantané du béton à 28 jours (GPa),
- f_{cm} est la résistance moyenne du béton à 28 jours (MPa).

4.1.3.1.2. Caractérisation du comportement en traction

L'objectif de cette étude est de caractériser le comportement en traction des BFUP étudiés. Il existe deux méthodes expérimentales pour le déterminer.

- La méthode directe consiste à effectuer les essais de traction directe sur des éprouvettes avec ou sans entaille. La réalisation des essais de traction directe sur éprouvettes sans entaille semble plus appropriée pour caractériser la loi de comportement en traction des BFUP (Habel, 2004), (Markovic, 2006), (Wuest, 2007) et (Baby, 2012). En revanche, ces essais sont difficiles à mettre en œuvre, sont jugés pénalisants et ne sont pas forcément représentatifs du comportement du matériau dans la structure (AFGC, 2002, 2013).
- La méthode indirecte consiste à réaliser des essais de flexion 3 ou 4 points, à partir desquels la loi de comportement en traction est déterminée par une analyse inverse. (Baby, 2012) a préconisé les essais de flexion 4 points sur prismes non entaillés pour caractériser la loi de comportement en traction quelle que soit

l'épaisseur des éléments (sans distinguer les éléments de type épais ou de type plaque mince).

Durant notre étude, l'objectif était de caractériser la loi de comportement en traction des BFUP étudiés en se basant sur les normes ou recommandations existants. Pour pouvoir répondre aux appels d'offre spécifiques au BFUP, il est indispensable de caractériser les matériaux conformément aux recommandations (AFGC, 2002, 2013) et à la prénorme (PR NF P18-710). Ceci signifie que, pour chaque type d'application visée, élément épais ou plaque mince, il faut définir leur propre loi de comportement en traction.

Dans le cas d'une application de type élément épais que nous présenterons dans le dernier chapitre, nous avons respecté les recommandations (AFGC, 2002, 2013) pour caractériser la loi de comportement en traction. Il s'agit de déterminer la résistance élastique par les essais de flexion 4 points sur prismes non entaillés, et la loi de comportement en traction avec la phase post-fissuration par les essais de flexion 3 points sur prismes entaillés. Les essais de traction directe sur prismes entaillés ont été réalisés pour la formule 880-2%-MK à titre de comparaison en raison des difficultés de mise en œuvre. Les dimensions de l'éprouvette prismatique pour ces essais sont de 7x7x28 cm conformément à celles recommandées par (AFGC, 2013). Ces dimensions sont déterminées en fonction de la taille des fibres qui est inférieure à 15 mm.

4.1.3.1.2.1. Essais de traction par flexion

Compte tenu de la difficulté de réalisation des essais de traction directe et du risque de sous-estimation de la résistance en traction directe obtenue sur des éprouvettes entaillées, (AFGC, 2013) et (PR NF P18-710) proposent de caractériser les performances en traction des BFUP par le biais d'essais de flexion. Deux types d'essais sont proposés. D'une part des essais de flexion quatre points sur prismes non entaillés qui permettent d'accéder à la résistance élastique en traction, avec une correction de l'effet d'échelle. Et d'autre part, des essais de flexion trois points sur prismes entaillés qui permettent d'obtenir la loi de comportement avec la phase post-fissuration qui rend compte de la contribution des fibres, après application d'une méthode d'exploitation dite méthode inverse.

➤ Détermination de la résistance élastique en traction

A défaut d'essai de traction directe, il est possible d'obtenir la résistance élastique en traction sur la base des essais de flexion quatre points sur prismes non entaillés. Pour cela, il

suffit d'extraire des essais de flexion la valeur de l'effort F_{nl} correspondant à la perte de linéarité de la courbe de l'effort en fonction de la flèche vraie. Par la suite, la résistance élastique obtenue en flexion $f_{ct,fl}$ est calculée selon l'équation :

$$f_{ct,fl} = \frac{3F_{nl}}{a^2} \quad (4 - 4)$$

où :

- F_{nl} est l'effort de flexion correspondant à la perte de linéarité en N.
- a est la hauteur du prisme en mm.
- $f_{ct,fl}$ est la contrainte équivalente obtenue en flexion en MPa.

Par la suite, la résistance élastique en traction est obtenue en prenant en compte l'effet d'échelle selon l'équation (4 - 5) :

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} * \frac{\alpha_{fl} * a^{0,7}}{1 + \alpha_{fl} * a^{0,7}} \quad (4 - 5)$$

Avec $\alpha_{fl} = 0,08$; a la hauteur du prisme en mm ; $f_{ct,fl}$ la contrainte équivalente correspondant à la perte de linéarité en MPa.

L'essai de flexion quatre points est piloté en flèche avec une vitesse de 0,1 mm/mn préconisée par (AFGC, 2013). L'instrumentation des capteurs de déplacement sur l'éprouvette est indiquée sur la Figure 4 - 4 et est conforme aux recommandations de (AFGC, 2013).

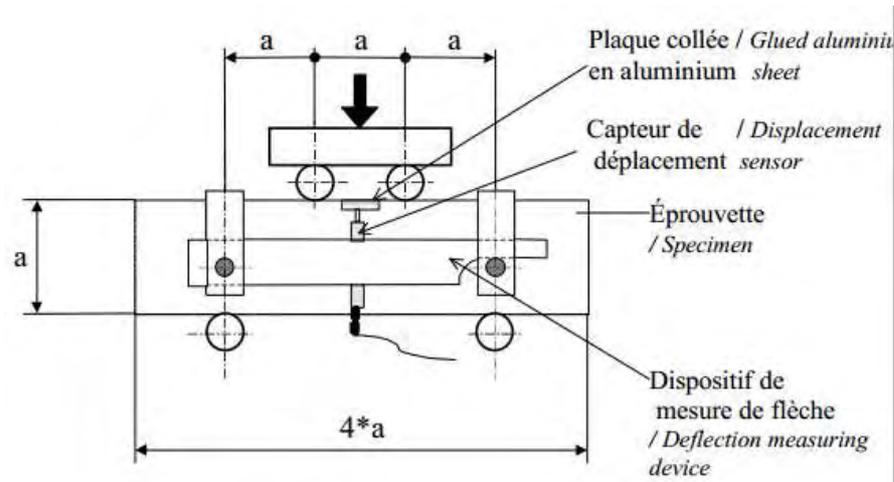


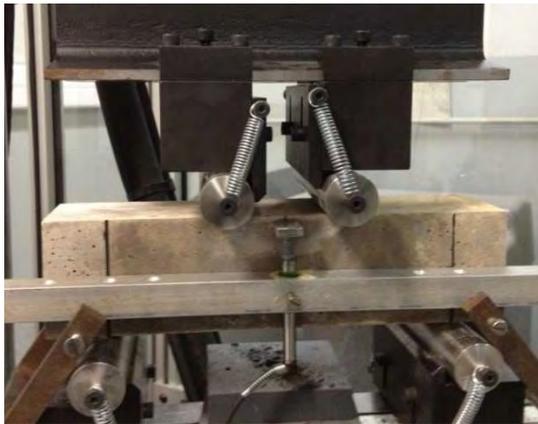
Figure 4 - 4: Configuration d'essai de flexion 4 points (AFGC, 2013)

Le capteur de déplacement permettant de mesurer la flèche doit être fixé par un dispositif spécifique sur l'échantillon afin de mesurer la flèche vraie de l'échantillon au cours de l'essai. En effet, sans un tel dispositif, la mesure de la flèche est faussée par les tassements aux points d'application des forces et aux appuis ainsi que par les déformations du montage lui-même.

L'éprouvette est ensuite placée sur le banc d'essai et, compte tenu des dimensions de nos éprouvettes 7x7x28 cm, la distance entre appuis est réglée à 21 cm et la distance entre les points de chargement est de 7 cm. L'essai est poursuivi jusqu'à une flèche mesurée directement sur l'échantillon de 2 mm, ce qui permet d'obtenir une durée d'essai raisonnable d'environ 20 minutes.

➤ Détermination de la loi de comportement et du comportement post-fissuration

La loi de comportement en traction des BFUP se distingue des bétons non fibrés par l'existence d'une phase post-pic et d'une ductilité grâce à l'action des fibres. L'essai de flexion trois points s'effectue sur prismes entaillés de dimensions 7x7x28 cm, pour avoir une localisation efficace de la fissure (AFGC, 2013). L'entaille est réalisée en section centrale, du côté de la face tendue lors de l'essai de flexion. La profondeur de l'entaille est égale à 10% de la hauteur du prisme, soit 7 mm dans notre cas. La largeur de l'entaille est de 4 mm environ. Le dispositif d'essai est présenté sur les Figure 4 - 5 et Figure 4 - 6.



(a) Essai de flexion 4 points



(b) Essais de flexion 3 points

Figure 4 - 5: Dispositif d'essai de traction par flexion



Plots de fixation du capteur



Capteur pontant fixé sur l'éprouvette pour la mesure d'ouverture de fissure

Figure 4 - 6: Instrumentation du capteur pour la mesure de l'ouverture de fissure

L'éprouvette est ensuite placée sur le banc d'essai, identique à celui utilisé pour les essais de flexion quatre points, avec le point de chargement situé au milieu de l'éprouvette. Une fois le capteur d'ouverture de fissure fixé, l'essai est lancé et est asservi en ouverture de fissure avec une vitesse de chargement de 0,025 mm/mn (AFGC, 2013). L'essai est poursuivi jusqu'à l'obtention d'une ouverture de fissure de 1,05 mm, ce qui permet d'avoir une durée d'essai raisonnable d'environ 40 minutes. Les données brutes sont ensuite exportées et analysées pour déterminer la loi de comportement post-fissuration en traction.

4.1.3.1.2.2. Essai de traction directe

(AFGC, 2013) recommande de réaliser les essais de traction, soit sur les éprouvettes prismatiques entaillées pour localiser l'apparition de la fissure, soit sur les éprouvettes diabolos sans entailles. Compte tenu du système d'encastrement de la presse du LMDC, des essais de traction directe sur prismes 7x7x28 cm entaillés ont été réalisés pour déterminer la

loi de comportement en traction de nos BFUP. L'ouverture de fissure est mesurée directement au niveau de l'entaille.

Le dispositif utilisé pour les essais de traction directe est présenté sur la Figure 4 - 7. La liaison de type encastrement entre l'éprouvette et l'embase de la presse est assurée par une colle à durcissement rapide (15 minutes). Les extrémités de l'éprouvette sont entaillées à une profondeur de 10 mm afin d'augmenter la surface de contact de l'interface, et donc ainsi d'améliorer l'adhérence. Les éprouvettes sont également entaillées à mi-hauteur afin de localiser de la zone de fissure.

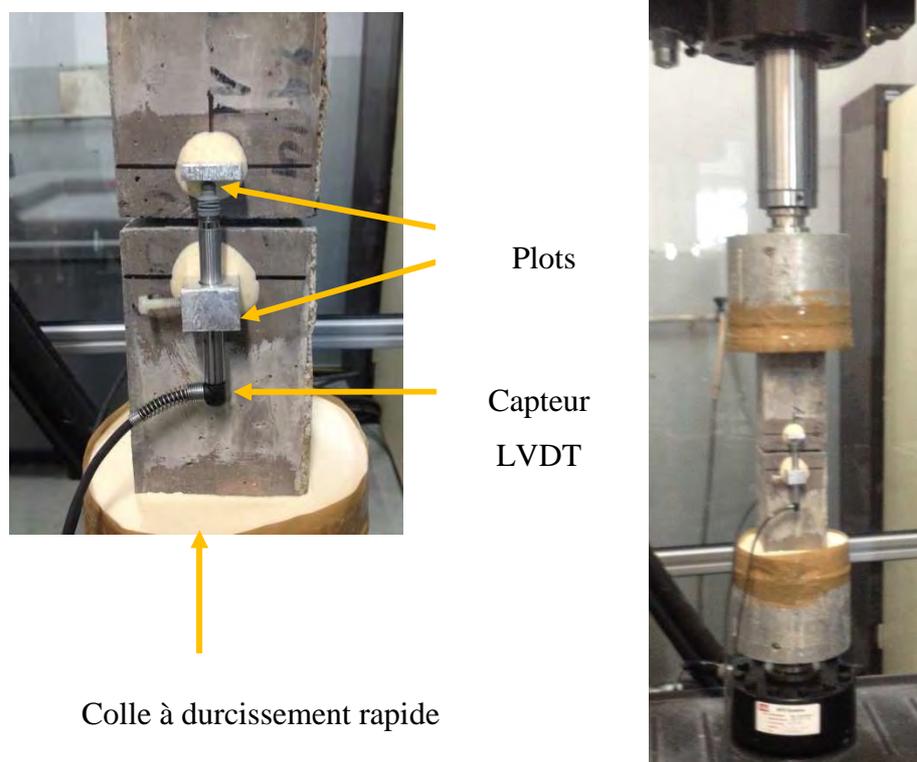


Figure 4 - 7: Dispositif d'essai de traction directe

L'essai est asservi en ouverture de fissure mesurée par un des capteurs fixés au niveau de l'entaille, suivant une vitesse de 0,025mm/mn (AFGC, 2013). L'essai s'achève lorsque le capteur mesure une ouverture de fissure de 1,05mm, ce qui permet d'avoir une durée d'essai raisonnable (40 minutes). Les données brutes sont ensuite analysées pour déterminer la loi de comportement en traction, en particulier pour la phase post-fissuration.

4.1.3.2. Déformations différées

Les essais de retrait et de fluage ont pour objectif de caractériser le comportement différé à long terme respectivement libre et sous contrainte mécanique maintenue dans le temps.

Dans le cas de notre étude, le fluage en compression uniaxiale a été étudié. La variation dimensionnelle a été suivie sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 11x22 cm. Les mesures de retrait ont été effectuées pour quatre BFUP avec deux séries, la première a été démarrée à partir de 24 heures et la deuxième à partir de 29 jours. La deuxième série a été mesurée en parallèle avec les mesures de fluage, qui ont été réalisées sur les deux BFUP de formulations et de performances mécaniques les plus proches, le 880-2%-FS et le 880-2%-MK à base respectivement de fumée de silice et de métakaolin. Le programme expérimental est synthétisé dans le Tableau 4 - 3.

Tableau 4 - 3: Programme expérimental établi pour l'étude du comportement différé

Essais	Type d'éprouvette	Nombre d'éprouvette	Conservation	Echéance (jours)
Retrait	φ11x22cm	6	Endogène ou dessiccation	Démarrage à 1 ou 29 jours
Fluage	φ11x22cm	6	Cure endogène puis endogène ou dessiccation	Démarrage à 29 jours

Le comportement différé libre de retrait sera étudié en relevant les déformations longitudinales des éprouvettes soumises parallèlement à deux modes de conservation :

- le mode endogène, qui traduit le comportement du matériau au cœur de la structure. Les éprouvettes sont scellées pour empêcher tout échange hydrique avec le milieu extérieur. Pour cela, après leur démoulage à 24 heures, elles sont recouvertes sur toute leur surface par une double couche de papier d'aluminium adhésif.
- le mode dessiccation ou en séchage, qui traduit le comportement du béton de surface. Pour simuler ce mode, les éprouvettes sont recouvertes de papier d'aluminium seulement sur leurs faces supérieures et inférieures afin de favoriser un échange hydrique radial avec le milieu extérieur. Cette protection permet également de reproduire les conditions hydriques des éprouvettes de fluage en dessiccation dont les faces inférieures et supérieures sont au contact du bâti de fluage et ne peuvent donc pas sécher.

Après leur conditionnement, les éprouvettes sont placées dans une salle climatisée à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative HR de $50 \pm 5\%$ pour les mesures de retrait qui respectent les recommandations (RILEM TC 107-CSP, 1998).

Les éprouvettes de fluage sont chargées à 29 jours, après avoir subi une cure endogène à 20°C et donc un retrait endogène préalable au fluage. Ce choix a été fait pour être représentatif des conditions réelles du béton d'un élément préfabriqué qui serait conservé à l'usine et protégé de la dessiccation pendant sa cure puis chargé après 28 jours. Durant l'essai de fluage, trois éprouvettes demeureront en mode endogène et trois pourront sécher sous charge. De manière conventionnelle, la déformation totale d'un béton est définie comme étant la somme de la déformation élastique instantanée ($\epsilon_{\text{instantanée}}$) due à l'application de la contrainte, et la déformation différée qui elle-même se décompose en une déformation de retrait ($\epsilon_{\text{retrait}}$) et une déformation de fluage (ϵ_{fluage}). Ce découpage est illustré plus en détails dans la Figure 4 - 8.

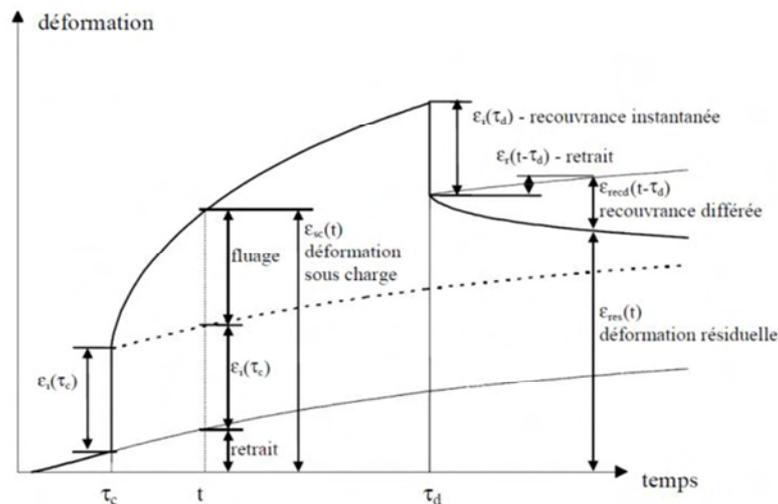


Figure 4 - 8: Décomposition conventionnelle des déformations d'un béton selon (Proust, 2002)

D'après la Figure 4 - 8, pour obtenir la déformation de fluage, il suffit de soustraire de la déformation totale mesurée sur les éprouvettes sous chargement la part de déformation instantanée lors de la mise en fluage, et la part de déformation libre mesurée en parallèle aux mêmes échéances sur les éprouvettes de retrait conservées dans les mêmes conditions thermo-hydrriques. La recouvrance correspond à la déformation obtenue au déchargement. Elle se décompose également en une part instantanée et une part différée.

4.1.3.2.1. Protocole pour les essais de retrait libre

Six éprouvettes cylindriques de béton ont été fabriquées dans des moules en PVC de diamètre 11,8 cm et de hauteur 23,5 cm. Trois d'entre elles sont destinées aux mesures de retrait endogène, et trois autres pour les mesures de retrait total. Sur chaque éprouvette, un plot en acier est placé au fond du moule avant coulage du béton pour qu'il soit inséré dans la

face inférieure. Juste avant le début des mesures à 1 jour, un deuxième plot est collé sur la face supérieure rectifiée.

Pour suivre les variations dimensionnelles axiales de retrait, un rétractomètre muni d'un afficheur micrométrique avec une incertitude de ± 10 microdéformations est utilisé (Figure 4 - 9).

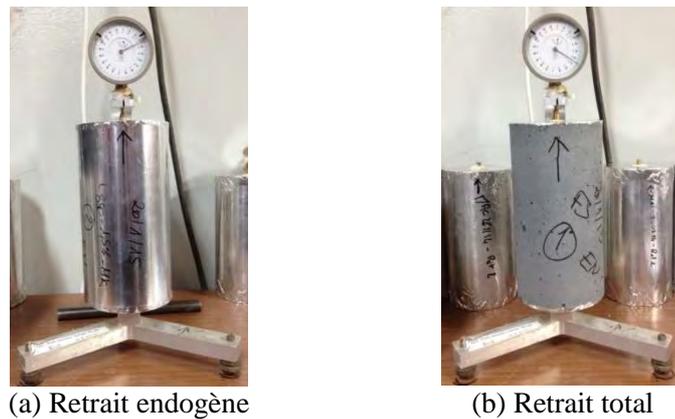


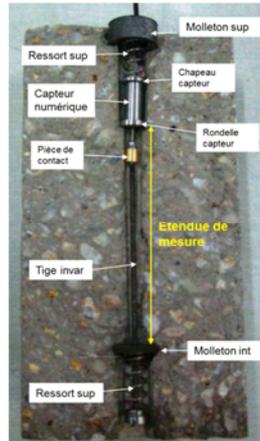
Figure 4 - 9: Dispositif de mesure de retrait

Les mesures de retrait débutent 24 heures après la fabrication du béton pour la première série d'essai de retrait. Pour la deuxième série, qui servira à suivre le retrait parallèlement aux essais de fluage pour pouvoir en déduire les déformations de fluage, les mesures ont débuté à 48h. Le retrait a été mesuré pendant la cure endogène correspondant à la phase avant lancement des essais de fluage. A l'échéance de mise en charge de fluage à 29 jours, trois éprouvettes ont été conservées en endogène et trois autres ont été mises en dessiccation pour suivre respectivement le retrait endogène et total. A chaque mesure de retrait, la perte de masse liée au séchage des éprouvettes est également relevée. Dans le cas des échantillons de retrait endogène, cette précaution sert à vérifier que l'étanchéité est efficace et qu'il n'y a pas de retrait de dessiccation parasite.

4.1.3.2.2. Déformations différées sous charge

L'essai de fluage en compression uniaxiale consiste à mesurer la déformation d'une éprouvette de béton soumise à une contrainte de compression maintenue dans le temps pendant une longue période (environ six mois minimum généralement). Les essais ont été réalisés dans une salle à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et $50\% \pm 5\%$ HR conformément aux recommandations (RILEM TC 107-CSP, 1998). Pour chaque formulation, six éprouvettes de béton sont confectionnées dans des moules en PVC de 11,8 cm de diamètre et de 22,5 cm de hauteur

équipés d'inserts métalliques permettant la mise en place du système de mesure de déformations. Après démoulage, les éprouvettes sont rectifiées. Avant le lancement des essais de fluage, un capteur numérique, ainsi que l'ensemble des éléments nécessaires à son maintien, sont positionnés dans la réservation créée par l'insert métallique lors du coulage (Ladaoui, 2010).



(a) Instrumentation du capteur pour les mesures de fluage



(b) Bâti de fluage en compression uniaxiale avec éprouvettes en condition endogène (en haut) et éprouvette en dessiccation (en bas)

Figure 4 - 10: Dispositif d'essai de fluage

Ce capteur est relié à un ordinateur permettant d'enregistrer les déplacements avec une précision au micromètre, et d'en déduire les déformations sous charge. Une fois toutes les éprouvettes instrumentées, elles sont placées par paire sur chaque bâti de fluage (Figure 4 - 10b), l'une en condition endogène, la seconde en condition de séchage, afin de déterminer respectivement le fluage propre et le fluage total en dessiccation, et d'en déduire le fluage de dessiccation. Ce dispositif permet de garantir l'application d'une contrainte identique sur les deux types de fluage mesurés.

En ce qui concerne le taux de chargement, étant donné l'objectif principal qui consistait à réaliser une caractérisation du fluage sans atteindre le fluage tertiaire, nous avons donc choisi un taux pour lequel la relation entre la contrainte appliquée et le fluage demeure linéaire, tout en tenant compte de la capacité du système hydraulique de mise en charge. Le taux de chargement choisi correspond à 25% de la valeur moyenne de la résistance en compression, déterminée le jour du chargement à 29 jours. Lors du chargement, trois cycles de chargement et de déchargement sont appliqués pour s'assurer de la bonne mise en place de l'ensemble du

dispositif (vérin, système de mesure, etc.), mais aussi pour s'assurer que le module d'élasticité est équivalent à celui mesuré sur les éprouvettes de caractérisation mécanique.

4.2. Résultats expérimentaux

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats des essais de caractérisation du comportement à l'état frais et du comportement mécanique des BFUP étudiés.

4.2.1. Mesures à l'état frais

Les valeurs de l'étalement, de masse volumique et de teneur en air occlus sont présentées dans le Tableau 4 - 4 pour l'ensemble des BFUP étudiés.

Tableau 4 - 4: Résultats des mesures à l'état frais

	880_2%_FS	880_2%_MK	880_1,5%_MK	680_2%_MK
Etalement (cm)	30	30	32	33
Masse volumique (kg/m ³)	2417	2419	2401	2408
Air occlus (%)	3,0	2,7	3,0	3,0

Les étalements sont égaux voire légèrement supérieurs à la valeur recommandée de 30 cm. La masse volumique des bétons se situe aux alentours de 2400 kg/m³. Quant aux valeurs de l'air occlus des bétons, elles varient entre 2,7% et 3,0%. Nous pouvons relever que ces valeurs sont légèrement supérieures à celles des BFUP de la gamme Ductal[®] et BSI[®] qui sont, elles, inférieures à 2%. Ceci peut être dû à une viscosité élevée de nos BFUP mise en évidence dans le chapitre 3 induisant une augmentation de la teneur en air entraîné lors du malaxage. Cet air pourrait ne pas s'échapper aussi aisément que pour d'autres bétons à la fin du malaxage du fait de la viscosité du mélange et y resterait piégé (Rougeau et al., 2000).

4.2.2. Comportement mécanique instantané

Cette partie détaille les caractérisations du comportement en compression (résistance, module d'élasticité, coefficient de Poisson et loi de comportement) et en traction (traction par flexion, traction directe et loi de comportement).

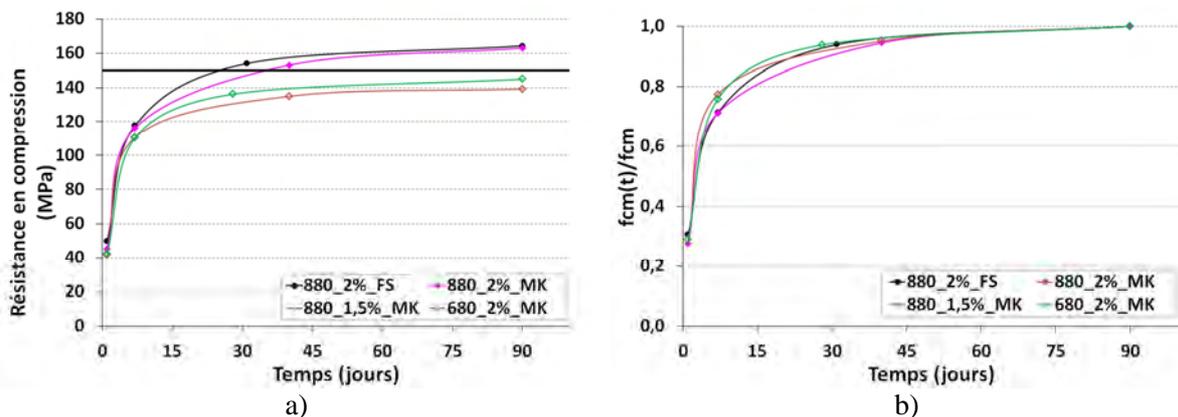
4.2.2.1. Résistances moyenne et caractéristique en compression

La résistance mécanique en compression constitue une caractéristique essentielle du béton et l'un des critères fondamentaux de notre étude. Le cahier des charges impose une résistance

caractéristique en compression supérieure ou égale à 150 MPa à 28 jours conformément à la future norme matériaux BFUP (PR NF P18-470).

Nous avons donc déterminé la résistance mécanique en compression des quatre BFUP étudiés à 1, 7, 28¹, et 90 jours. Les éprouvettes étaient conservées dans la salle humide à température et humidité contrôlées ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ HR) conformément aux normes (NF EN 12390, 2009) et (PR NF P18-470).

Les évolutions des résistances en compression moyennes, ainsi que leur cinétique d'évolution exprimée en terme de résistance normée par rapport à la valeur à 90 jours sont présentées sur la Figure 4 – 11. Nous rappelons qu'aucun traitement thermique n'est appliqué. Celles-ci sont comparées avec la valeur cible de 150 MPa, bien qu'il s'agisse de résistance caractéristique et non moyenne, exigée par le cahier des charges pour pouvoir utiliser la dénomination de BFUP-S utilisables pour les structures (PR NF P18-470).



On peut tout d'abord constater que le BFUP avec fumée de silice atteint la valeur de 154 MPa à l'échéance de 31 jours. Le BFUP à base de métakaolin et de composition quasi équivalente dépasse cette valeur à 44 jours (pas de valeur à 28 jours). Les deux formulations avec des dosages moindres en fibres et en liant sont moins résistantes, mais atteignent tout de même 140 MPa à 90 jours.

¹ Suite à un problème qui a occasionné l'indisponibilité de la presse pendant une période de plusieurs jours, l'échéance de 28 jours n'a pu être respectée avec exactitude. Les dates exactes, comprises entre 30 et 40 jours, ont été reportées dans les graphes correspondants.

Une analyse plus détaillée de ces évolutions montrent que, dès le très jeune âge à 1 jour, les résistances sont déjà très élevées puisqu'elles sont comprises entre 40 MPa et 50 MPa. La valeur la plus forte est obtenue par la composition à base de fumée de silice, qui semble donc plus réactive au jeune âge que le métakaolin. Ces résistances élevées à court terme sont très intéressantes et favorables vis-à-vis des pratiques en usine de préfabrication, qui exigent le décoffrage des pièces et leur manutention sans risque de fissuration à 24 heures (ou moins). A 7 jours, les résistances en compression sont comprises entre 110 MPa et 117 MPa, ce qui représente 70% à 80% de la résistance maximale. Les résistances en compression continuent à se développer pour atteindre des valeurs de 154 MPa à 31 jours pour la composition 880-2%-FS, de 153 MPa à 44 jours pour la composition 880-2%-MK, de 135 MPa à 40 jours pour la formule 880-1,5%-MK, et de 136 MPa à 28 jours pour la formule 680-2%-MK. Au-delà de ces échéances, les résistances en compression augmentent de manière plus modérée et des valeurs comprises entre 142 MPa à 165 MPa sont mesurées à 90 jours.

L'analyse des cinétiques d'évolution des résistances en compression montre un comportement similaire des différents BFUP. En effet, ces BFUP présentent de fortes cinétiques entre 1 et 7 jours, puisque 72% à 75% de la résistance maximale est atteinte. La cinétique diminue à partir de 7 jours et s'atténue au-delà de 28 jours sans toutefois être négligeable. Ces évolutions sont en accord avec celles observées sur des BUHP par (Richard et Cheyrezy, 1995).

A partir de l'analyse comparative des résistances moyennes en compression des différents BFUP, plusieurs commentaires peuvent être faits par rapport à l'effet des paramètres de formulations suivants :

- Effet de la nature de l'addition et de la teneur en liant : les performances des deux BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK, qui ne diffèrent que par le type et la proportion d'additions minérales, respectivement 25% de fumée de silice et 30% de métakaolin, sont comparables, démontrant la réactivité du métakaolin et la pertinence d'utiliser cette ultrafine en substitution de la fumée de silice. La confrontation entre les bétons à base de métakaolin, 880-2%-MK et 680-2%-MK, met en évidence l'effet de la teneur en liant sur les résistances en compression. La réduction de la teneur en liant avec le même dosage en fibres pour la formulation 680-2%-MK provoque une diminution de la résistance en compression de 10,9% à 28 jours. Ce résultat peut être attribué à une

moindre compacité, induite par un manque de fines qui doivent combler les vides du squelette granulaire par effet filler.

- Effet de la teneur en fibres métalliques : la confrontation des deux formules 880-2%-MK et 880-1,5%-MK, qui ne se distinguent que par leur dosage en fibres, met en évidence que la réduction de la quantité de fibres provoque une baisse de la résistance en compression de 11,7% à 28 jours. Ce résultat confirme les tendances observées par (Bonneau et al., 1997) et (Tafroui et al., 2009).

A partir des résultats des résistances moyennes en compression, nous pouvons évaluer la résistance en compression caractéristique afin d'identifier les formulations qui respectent le critère de 150 MPa et ainsi classer les BFUP en fonction des classes définies par la future norme BFUP (PR NF P18-470). Pour ce calcul, il faut appliquer la relation (4 – 1) conformément aux recommandations (AFGC, 2013) et à la prénorme (PR NF P18-470) :

$$f_{ck} = f_{cm} - \text{coefficient de Student} \times \text{écart type} \quad (4 - 1)$$

Où le coefficient de Student est fonction du nombre d'éprouvettes testées. Dans notre cas, il est égal à 2,015 pour 6 éprouvettes testées. Les valeurs de résistances caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4 – 5 pour chaque BFUP étudié.

Tableau 4 – 5 : Détermination de la résistance caractéristique des BFUP étudiés

	880-2%-FS (31 jours)	880-2%-MK (44 jours)	880-1,5%-MK (40 jours)	680-2%-MK (28 jours)
f_{cm} (MPa) / écart type	154 / 1,3	153 / 1,4	135 / 1,2	136 / 1,6
f_{ck} (MPa)	151	150	132	132

Sur la base de ces résultats, nous pouvons identifier deux familles de BFUP (en faisant une réserve sur les dates d'essai différentes de 28 jours). La première famille, composée des formulations 880-2%-FS et 880-2%-MK, a des résistances caractéristiques en compression satisfaisant la valeur cible exigée de 150 MPa, ces bétons peuvent donc être classés comme étant des BFUP structurels notés BFUP-S au sens de la norme (NF P18-470). La deuxième famille, composée des formulations 880-1,5%-MK et 680-2%-MK, se caractérise par des résistances en compression inférieures à 150 MPa mais néanmoins supérieures à 130 MPa. Cette famille peut être classée comme BFUP non structurel ou architectural, et notée BFUP-Z (NF P18-470).

4.2.2.2. Module d'élasticité en compression et coefficient de Poisson

La rigidité du béton est caractérisée par le module de Young qui est un paramètre indispensable au dimensionnement des structures en béton. L'évolution du module d'élasticité est présentée sur la Figure 4 – 12, où chaque valeur correspond à la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes cylindriques de dimensions 11x22cm rectifiées.

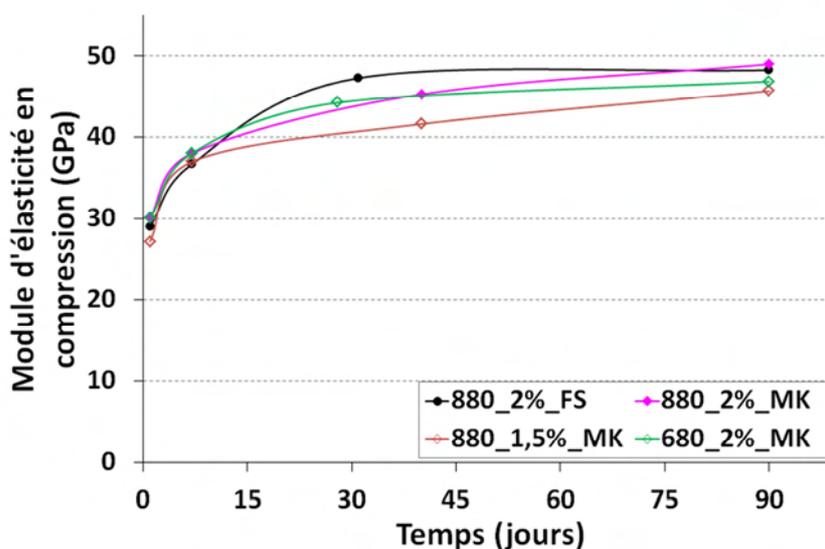


Figure 4 – 12 : Evolution en fonction du temps du module d'élasticité des BFUP étudiés

Ces résultats montrent que les BFUP présentent un module d'élasticité compris entre 45 GPa et 49 GPa à 90 jours. Les cinétiques d'évolution sont assez proches. Au très jeune âge, à 1 jour, les modules de Young des BFUP varient entre 27 GPa et 30 GPa. Les valeurs obtenues à long terme sont en accord avec celles indiquées par (AFGC, 2013) et (PR NF P18-470) pour les BFUP non traités thermiquement. Il est important de noter que ces modules sont supérieurs à ceux des bétons ordinaires grâce à l'amélioration de la compacité du mélange, et à la teneur en ciment anhydre résiduelle, conséquence du faible rapport E/C. En effet, (Habel, 2004) a montré qu'il reste au moins 30% de ciment anhydre présent dans la matrice d'un BFUP à plus de 90 jours. Or, le ciment anhydre se caractérise par une plus forte rigidité, autour de 120 GPa d'après (Boumiz, 1995) cité par (Vernet et al, 1998).

Ces valeurs expérimentales sont ensuite comparées avec les valeurs de module d'élasticité calculées à partir des valeurs expérimentales des résistances en compression selon la formule de l'Eurocode 2 (EN 1992-2, 2006). La comparaison des valeurs calculées et mesurées des modules d'élasticité est présentée dans le Tableau 4 – 6, dans lequel sont également présentés les résultats des coefficients de Poisson de chaque formulation.

Tableau 4 – 6 : Modules d'élasticité mesurés et estimés selon Eurocode 2 et coefficients de Poisson mesurés pour les différents BFUP

		880-2%-FS	880-2%-MK	880-1,5%-MK	680-2%-MK
Résistance en compression moyenne f_{cm} (MPa)		155	154	142	145
Module d'élasticité (GPa)	Expérimental	47	45	42	44
	EC2	50	50	48	49
Coefficient de Poisson		0,21	0,21	0,22	0,22

L'analyse comparative avec les règlements de dimensionnement permet d'observer que les valeurs mesurées sont surestimées par l'Eurocode 2 (de 5 à 15%). Les coefficients de Poisson des différentes formulations sont de 0,21 à 0,22, ce qui est proche de ceux des bétons ordinaires et des BFUP de type Ductal® et BSI® (AFGC, 2002) qui ont un coefficient de Poisson de 0,2.

4.2.2.3. Loi de comportement en compression

La Figure 4 – 13 présente l'évolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation des BFUP étudiés. Ces essais ont été réalisés à 28 jours, à vitesse de déformation imposée, sur 5 éprouvettes pour chaque formulation.

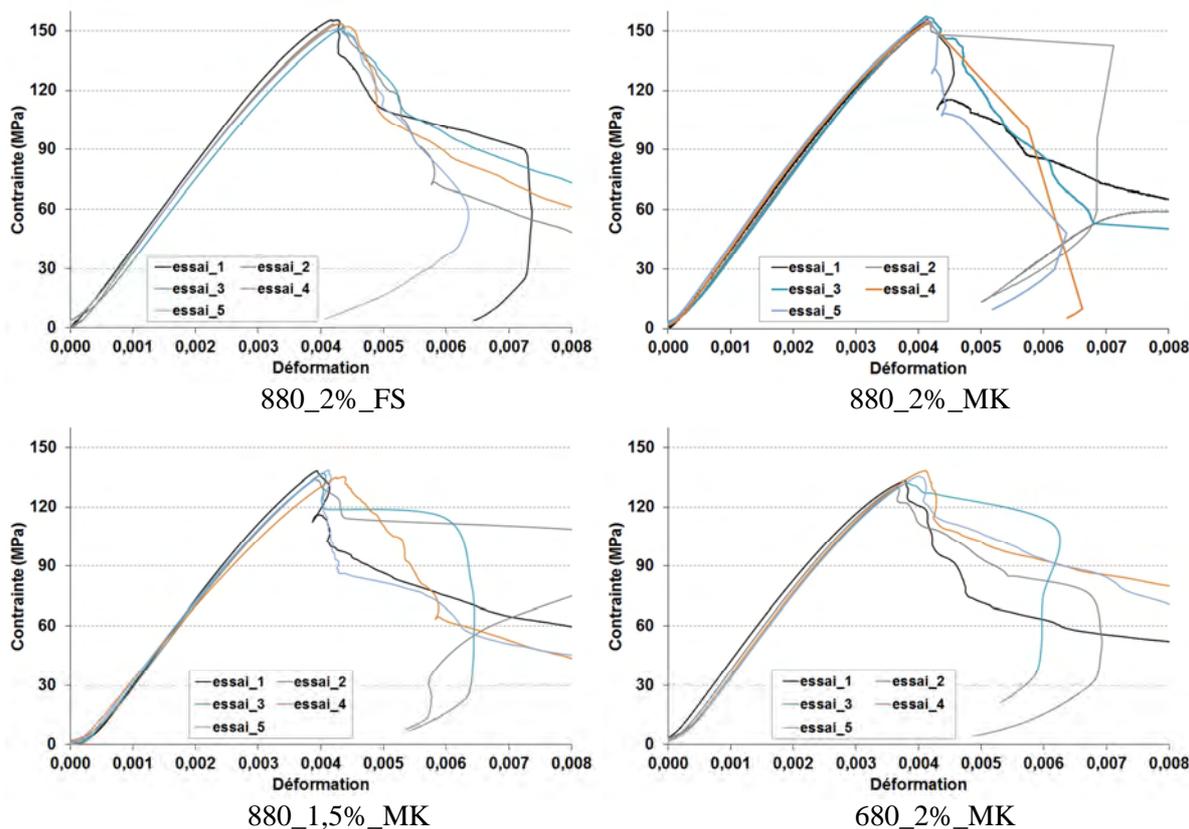


Figure 4 – 13 : Relation contrainte-déformation des BFUP étudiés, essais réalisés à 28 jours

Sur la base des résultats obtenus, nous remarquons qu'il existe aux faibles charges, correspondant à la pré-charge, des déformations importantes qui peuvent être attribuées à la mise en place et aux jeux de l'ensemble de l'essai (presse, système de mesure etc.). Au-delà de cette zone, le comportement en compression peut être décomposé en plusieurs phases successives :

- une phase élastique linéaire jusqu'à 90% de la contrainte maximale ;
- une phase non linéaire jusqu'à la rupture caractérisée par la valeur maximale de contrainte précédant une chute de la contrainte ;
- une phase adoucissante post-pic dont les caractéristiques, intensité de la contrainte résiduelle, déformation ultime, sont gouvernées par la présence des fibres métalliques.

L'incorporation des fibres permet bien d'éviter la rupture fragile et d'assurer un comportement ductile post-pic. Les allures post-pic montrent la difficulté du contrôle de l'essai en déformation. Néanmoins, malgré les allures incohérentes de la phase post-pic de certains essais, on peut constater que le comportement est conforme aux résultats d'études antérieures présentées dans (AFGC, 2013). Le Tableau 4 – 7 synthétise les valeurs des

caractéristiques du comportement en compression déterminées à partir des courbes contrainte-déformation des BFUP étudiés.

Tableau 4 – 7 : Valeurs caractéristiques du comportement en compression asservi en déplacement des BFUP étudiés

Formulation	f_{cm} (MPa)	Ecart type	f_{ck} (MPa)	Déformation au pic (%)	Module d'élasticité (GPa)	Coefficient de Poisson
880-2%-FS	153	1,4	150	0,428	47	0,21
880-2%-MK	154	1,1	152	0,413	45	0,21
880-1,5%-MK	136	1,8	131	0,406	42	0,22
680-2%-MK	134	1,9	130	0,387	44	0,22

Nous pouvons observer que les résistances moyennes en compression obtenues lors de cet essai asservi en déplacement concordent avec celles obtenues à partir des essais pilotés en force. Les déformations moyennes au pic sont comprises entre 0,387% et 0,428% et sont donc bien significativement supérieures à celle de 0,27% des recommandations (AFGC, 2013). L'incorporation de fibres métalliques dans la matrice cimentaire permet ainsi d'améliorer la ductilité du béton.

4.2.2.4. Comportement en traction

Le comportement en traction peut-être étudié à partir d'essais de traction directe, difficiles à mettre en œuvre, ou plus généralement à partir d'essais de flexion. Nous présentons les résultats des différents essais de flexion réalisés permettant de caractériser le comportement en traction de la totalité des formulations. Nous rappelons que la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) exige une valeur de résistance élastique en traction d'au moins 6 MPa pour la qualification de BFUP. Des essais de traction directe ont également été réalisés afin de vérifier si les résultats étaient concordants avec ceux obtenus à partir des essais de flexion. Néanmoins, compte tenu de la difficulté de ce type de test, cette confrontation n'a été entreprise que pour une seule formulation.

4.2.2.4.1. Détermination du comportement en traction par les essais de flexion

Le comportement en traction est caractérisé par :

- la résistance élastique moyenne $f_{ctm,el}$ et caractéristique en traction $f_{ctk,el}$ obtenues à partir d'essais en flexion 4 points sur prismes non entaillés ;

- la loi de comportement en traction contrainte–ouverture de fissure obtenue par la méthode d'analyse inverse appliquée aux données issues des essais en flexion 3 points sur prismes entaillés. L'exploitation de ces résultats permet également de déterminer la résistance moyenne f_{ctm} et caractéristique f_{ctfk} post-fissuration à la traction.

Ces données expérimentales nous permettent, non seulement de compléter la carte d'identité des BFUP au niveau du comportement mécanique en traction qui constitue une des spécificités et un des atouts majeurs par rapport aux bétons non fibrés, mais également d'en déduire les caractéristiques réglementaires à prendre en compte lors d'un dimensionnement en BFUP.

4.2.2.4.1.1. Détermination de la résistance élastique en traction ($f_{ct,el}$) par les essais en flexion quatre points sur prismes non entaillés

Pour chaque formulation BFUP, trois éprouvettes prismatiques sans entaille ont été testées en flexion 4 points. La Figure 4 – 14 représente les réponses « effort de flexion-flèche » de chaque essai et l'évolution moyenne obtenue pour chaque BFUP.

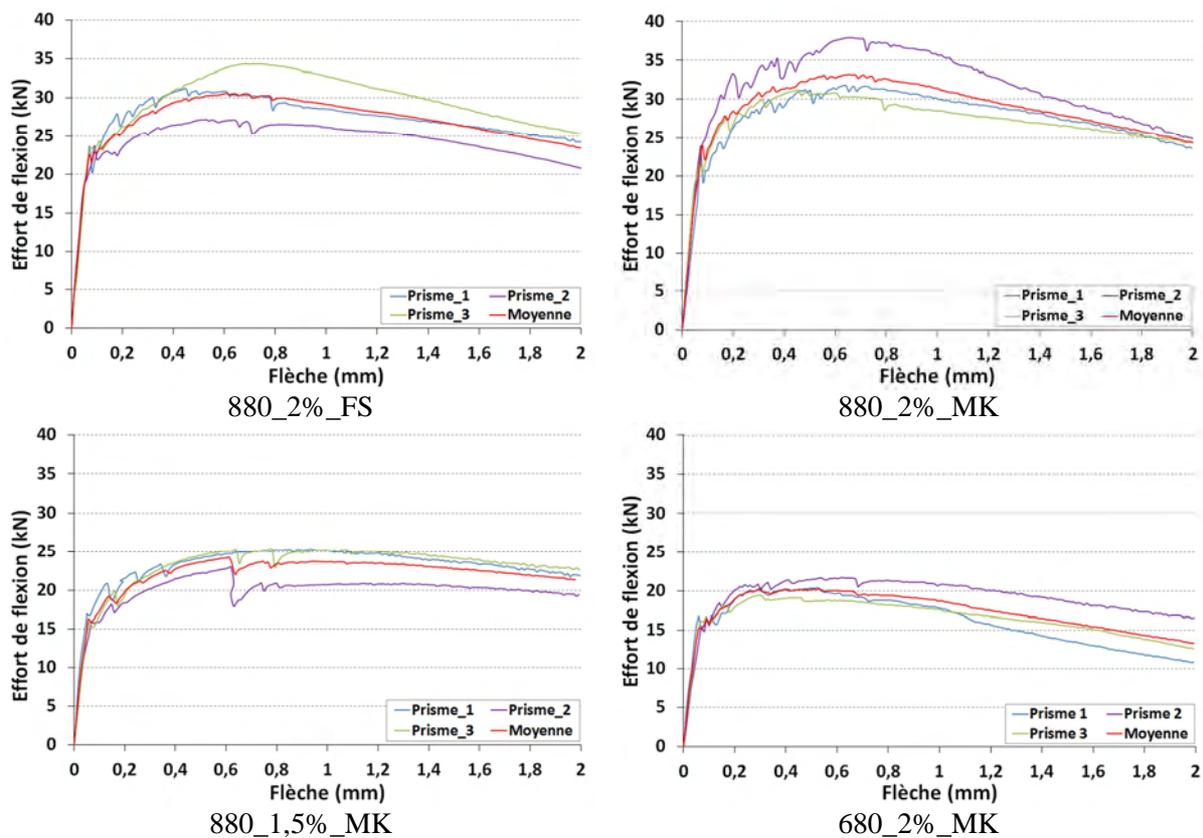


Figure 4 – 14 : Résultats des essais en flexion 4 points des différents BFUP

Une analyse globale de ces courbes « efforts de flexion-flèches » montre que :

- Tous les BFUP ont un comportement écrouissant caractérisé par une force maximale supérieure à celle correspondant à la limite d'élasticité définie par la perte de linéarité.
- Les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK présentent un comportement assez similaire avec une force maximale légèrement supérieure pour celle avec métakaolin, 33 kN contre 30 kN, et une phase post-pic quasiment identique avec une force autour de 24 kN pour une flèche de 2 mm. Le relevé du profil de fissuration sur les prismes montre une phase de multi-microfissuration entre la fin de la phase élastique, et la localisation de la macrofissure. Ces microfissures sont faiblement espacées. Ainsi, ces compositions peuvent être classées écrouissantes en flexion 4 points (Baby, 2012).
- Les allures des courbes force-flèche des BFUP 680-2%-MK et 880-1,5%-MK ont des comportements comparables aux deux formulations précédentes. Néanmoins, les efforts atteints sont inférieurs, avec une valeur au pic de 20 kN pour le 680-2%-MK et 24 kN pour le 880-1,5%-MK. Il est intéressant de noter que la résistance à la traction est davantage affectée par la réduction de la quantité de liant, 200 kg de ciment en moins pour 680-2%-MK, que par le plus faible dosage en fibres de 880-1,5%-MK, 1,5% au lieu de 2%. Le relevé du profil de fissuration met en évidence la localisation de la macrofissure sans phase de multi-microfissuration. Néanmoins, leurs courbes efforts de flexion-flèche démontrent bien le caractère écrouissant en flexion 4 points. Ces compositions peuvent être aussi classées écrouissantes en flexion (Baby, 2012).

Le Tableau 4 – 8 présente la valeur moyenne de l'effort de flexion F_{nl} qui correspond à la perte de linéarité, la valeur moyenne de la résistance élastique en flexion $f_{ct,fl}$, la résistance élastique moyenne $f_{ct,el}$ avec la prise en compte de l'effet d'échelle et la valeur caractéristique $f_{ctk,el}$ en traction. La détermination de la résistance élastique caractéristique $f_{ctk,el}$ a été effectuée selon la relation (4 – 2) :

$$f_{ctk,el} = f_{ct,el} - \text{coefficient de Student} \times \text{écart type} \quad (4 - 2)$$

Avec le coefficient de Student pris égal à 2,920 selon l'annexe 1 de la recommandation (AFGC, 2013) en fonction du nombre d'essais réalisés, soit trois dans notre cas.

Tableau 4 – 8 : Détermination des différents paramètres obtenus à partir des essais en flexion 4 points sur les différents BFUP

Formulation	880-2%-FS	880-2%-MK	880-1,5%-MK	680-2%-MK
F_{nl} (kN)	22,5	23,9	16,2	15,7
f_{ct,fl} (MPa)	13,8	14,7	9,9	9,6
f_{ctm,el} (MPa)	8,4	8,9	6,1	6,0
f_{ctk,el} (MPa)	8,0	8,0	6,0	5,9

D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que la résistance élastique caractéristique en traction est comprise entre 5,9 MPa et 8,0 MPa. Les valeurs maximales sont obtenues pour les BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK. La confrontation entre les résultats met en évidence une réduction des valeurs de f_{ctk,el} de 25% et 26% respectivement pour les formulations avec des dosages moindres en fibres 880-1,5%-MK et en liant 680-2,0%-MK. Ceci démontre que l'apparition des premières microfissures qui induisent la perte du comportement élastique dans les matériaux est contrôlée non seulement par la quantité de fibres capables de la prévenir, mais aussi par la quantité de liant et donc par la compacité qui régit la qualité de l'adhérence et de l'ancrage des fibres dans la matrice.

A partir des valeurs de f_{ctk,el} obtenues, les bétons 880-2%-FS, 880-2%-MK, et 880-1,5%-MK peuvent être qualifiés de BFUP vis-à-vis de leur résistance élastique en traction au sens de la prénorme (PR NF P18-470) puisqu'elle exige une résistance élastique en traction au moins égale à 6,0 MPa. Quant à la formule 680-2%-MK, elle présente une résistance élastique en traction de 5,9 MPa, ce qui est légèrement inférieur à la valeur recommandée.

4.2.2.4.1.2. Détermination de la loi post-fissuration à partir des essais en flexion trois points sur prismes entaillés

Pour chaque composition de BFUP, cinq éprouvettes prismatiques avec entaille ont été testées en flexion 3 points afin de déterminer la loi post-fissuration. Les courbes « contrainte équivalente–ouverture de fissure » sont présentées pour chaque type de BFUP sur la Figure 4 – 15. La contrainte équivalente de traction en fibre inférieure dans la section entaillée est calculée conformément à la théorie des poutres par le biais de la relation suivante :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h} \quad (4 - 3)$$

Où $\sigma_{\acute{e}q}$ est la contrainte équivalente de traction (MPa) ; M est le moment expérimental (N.mm) à mi-travée au niveau de la section entaillée considérée ; b est la largeur du prisme (mm) ; et h est la hauteur du prisme en retranchant la hauteur de l'entaille (mm).

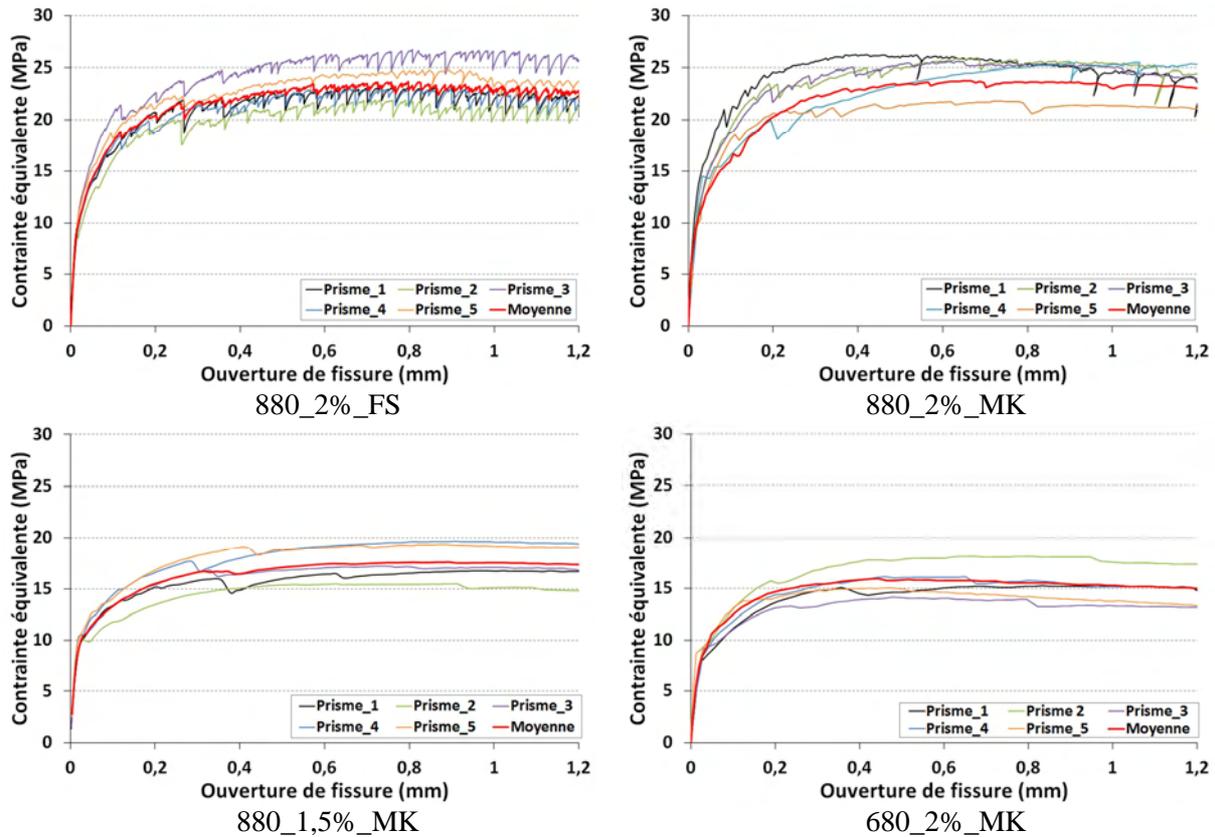


Figure 4 – 15 : Courbes « contrainte équivalente-ouverture de fissure » des BFUP étudiés

Avant d'analyser les comportements, sur la base des résultats obtenus, nous pouvons constater une légère dispersion entre les courbes de chaque BFUP, en particulier dans la phase post-fissuration de celles-ci. Ceci peut s'expliquer par la répartition et l'orientation des fibres qui peut légèrement différer d'une éprouvette à l'autre, malgré une technique de coulage que nous avons essayée de répéter à l'identique.

- La confrontation des courbes obtenues met en évidence l'effet de la teneur en fibres et de la compacité sur le comportement en flexion. Les BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK présentent un comportement similaire en flexion 3 points, avec une résistance moyenne maximale en flexion de 23,7 MPa ;
- dans le cas du BFUP 880-1,5%-MK, la diminution de la fraction volumique en fibres de 2% à 1,5% engendre une chute de la résistance moyenne maximale en flexion de 23,7 MPa à 17,6 MPa ;
- la réduction de la teneur en liant de la formule 680-2%-MK induit également une baisse de la résistance maximale en flexion à 15,9 MPa.

Ces résultats sont concordants avec ceux en flexion 4 points, et les mêmes hypothèses sur l'effet du dosage en fibres et l'effet de la compacité sur la qualité de leur ancrage dans la matrice peuvent être avancées.

La détermination de la loi « contrainte-ouverture de fissure » est réalisée par application de la méthode d'analyse inverse proposée par (AFGC, 2013) et détaillée dans l'annexe 2.

Les courbes « contrainte-ouverture de fissure » sont ainsi présentées pour les quatre BFUP étudiés sur la Figure 4 – 16.

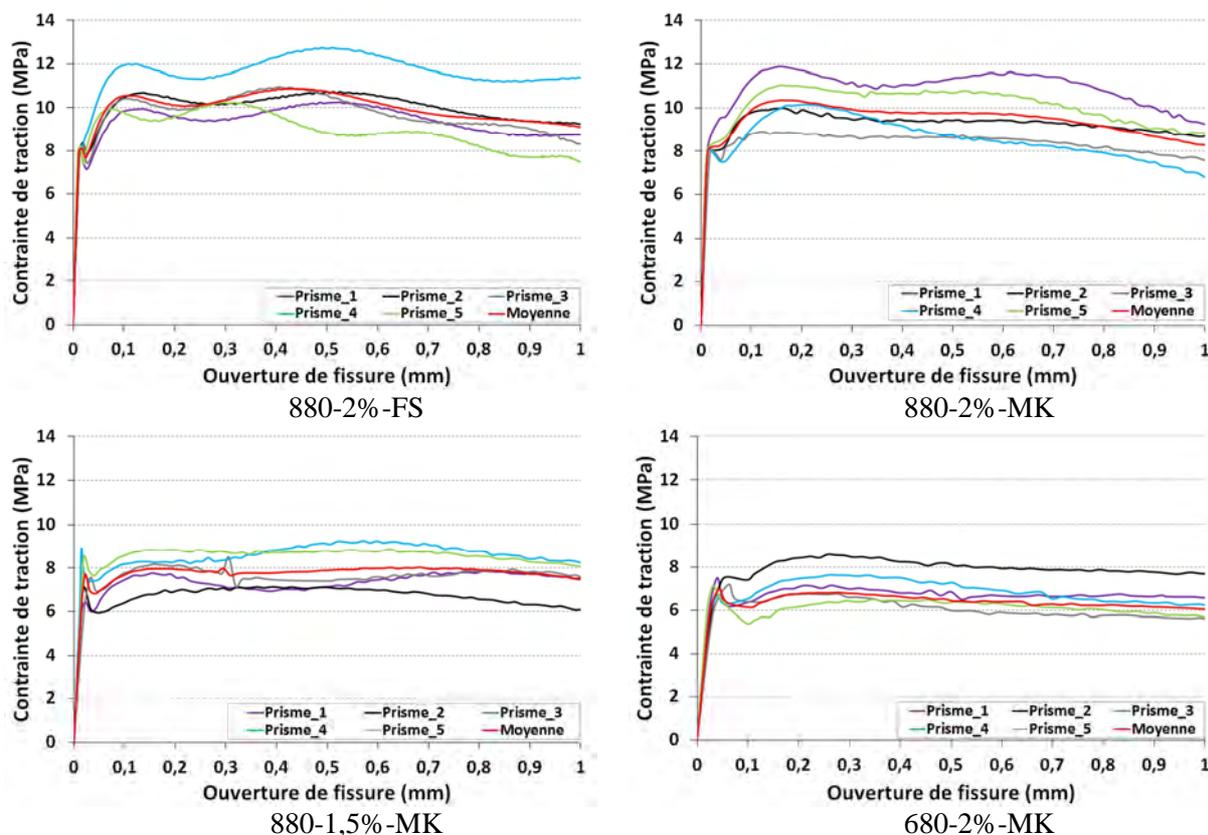


Figure 4 – 16 : Lois de comportement en traction obtenues par analyse inverse des BFUP étudiés

Les courbes se caractérisent par une phase linéaire avec un premier pic de contrainte correspondant à la résistance élastique de traction. On observe ensuite une légère chute de contrainte due à l'énergie libérée lors de l'ouverture de la fissure principale et à l'asservissement en ouverture de fissure de l'essai. Cette chute de résistance plus ou moins marquée, est souvent observée sur les BFUP adoucissants et peu écouissants, mais n'apparaît généralement pas dans le cas des BFUP très écouissants. Cette chute n'est pas considérée dans le règlement de calcul (PR NF P18-710) comme nous le verrons dans le chapitre 6.

. Puis, la contrainte ré-augmente pour atteindre un deuxième pic correspondant à la résistance en traction post-fissuration. Enfin, le palier post-fissuration est atteint sur lequel la contrainte demeure quasiment constante grâce à l'action des fibres qui reprennent les efforts de traction. Comme pour les résultats précédents, les meilleurs comportements, de plus assez semblables, sont observés pour le 880-2%-FS et le 880-2%-MK.

A partir de ces lois de comportement post-fissuration (σ - w) moyennes, obtenues sur 5 essais de flexion 3 points pour chaque BFUP, les lois post-fissuration caractéristiques peuvent être déduites en prenant en compte le coefficient de Student et les écarts type de chaque point de la courbe moyenne, ainsi que le coefficient d'orientation des fibres K_{global} , par la relation suivante :

$$\sigma(w)_{caractéristique} = (\sigma(w)_{moyenne} - (2,132 \cdot \text{écart type})) \cdot \frac{1}{K_{global}}$$

Avec K_{global} pris forfaitairement égal à 1,25 pour prendre en compte les effets globaux correspondant à des sollicitations qui requièrent l'effet des fibres dans les zones plus étendues et où un défaut localisé sera sans conséquence.

Lors de la conception, la valeur du facteur K d'orientation des fibres est pris forfaitairement selon le type de structure à dimensionner (épais ou plaque mince). Cette valeur doit être impérativement validée par les épreuves de convenances réalisées sur site lors de la fabrication de l'élément de structure. Les éprouvettes prélevées sur l'élément fabriqué sont ensuite testées pour déterminer le facteur K réel en faisant le rapport de la résistance en traction obtenue en laboratoire sur celle obtenue à partir des éprouvettes carottées.

Si la valeur réelle de K réel est très différente de celle utilisée pour le pré-dimensionnement, il convient de prendre en compte le K réel dans la loi de comportement en traction.

La Figure 4 – 17 présente les lois de comportement moyennes et caractéristiques en traction, déterminées grâce à analyse inverse à partir des essais de flexion.

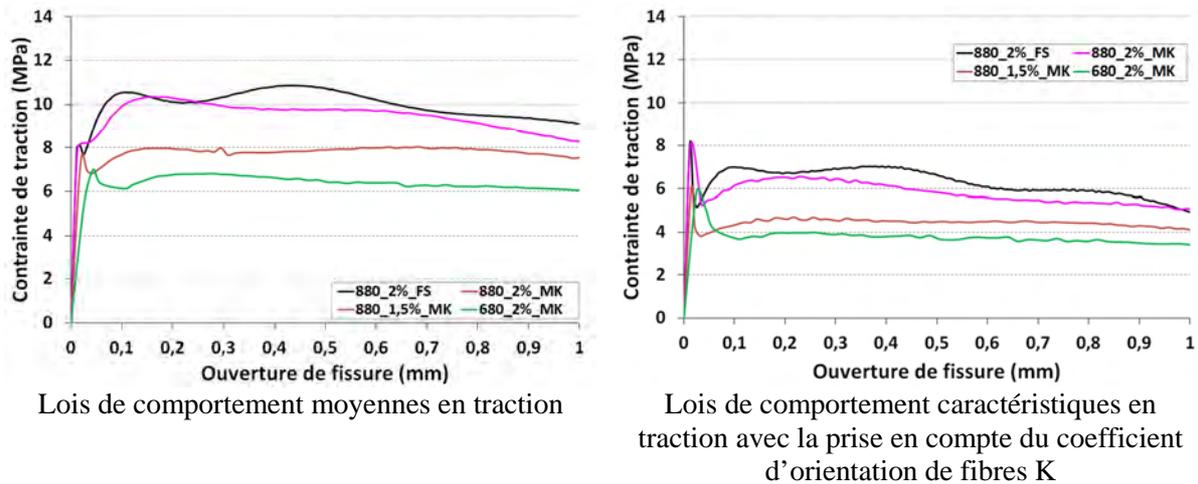


Figure 4 – 17 : Lois de comportement moyennes et caractéristiques en traction des BFUP étudiés

L'analyse comparative des lois de comportement moyennes et caractéristiques met en évidence des comportements singuliers. Alors que les résistances moyennes post-fissuration à la traction sont supérieures à la résistance élastique en traction pour 880-2%-FS et 880-2%-MK, égale pour 880-1,5%-MK, voire très légèrement inférieure pour 680-2%-MK. Et elles deviennent toutes plus faibles lorsqu'on passe en valeur caractéristique. Ce résultat provient du facteur d'orientation des fibres appliqué à la phase post-fissuration et de la plus forte dispersion des valeurs expérimentales dans cette même phase par rapport à la phase élastique, dispersion probablement liée aux fibres qui contrôlent le comportement dans cette phase de par leur orientation et leur nombre, au niveau de la fissure notamment.

Les valeurs des résistances post-fissuration moyennes et caractéristiques déterminées à partir de ces courbes sont présentées dans le Tableau 4 – 9 avec les résistances élastiques en traction.

Tableau 4 – 9 : Valeurs de résistance élastique et de résistance post-fissuration en traction des BFUP étudiés

Formulation	880-2%-FS	880-2%-MK	880-1,5%-MK	680-2%-MK
$f_{ctm,el}$ (MPa)	8,4	8,9	6,1	6,0
$f_{ctk,el}$ (MPa)	8,0	8,0	6,0	5,9
f_{ctfm} (MPa)	11,6	10,4	8,0	6,9
f_{ctfk} (MPa)	7,0	6,6	4,6	4,0

Nous pouvons constater qu'en loi moyenne, les résistances post-fissuration f_{ctfm} varient de 6,9 MPa à 11,6 MPa. Elles sont supérieures aux valeurs de résistance élastique moyenne en traction $f_{ctm,el}$ quel que soit le BFUP. En revanche, en loi caractéristique avec la prise en

compte notamment du facteur de réduction K d'orientation des fibres, les résistances post-fissuration f_{ctfk} sont significativement réduites, variant de 4,0 MPa à 7,0 MPa.

Grâce à l'exploitation de ces données, nous allons désormais pouvoir classer les différents BFUP en terme de comportement en traction, conformément à la prénorme matériaux (PR NF P18-470). Ce classement est primordial puisqu'il conditionne les méthodes de dimensionnement de la future norme calcul en BFUP (PR NF P18-710). La confrontation des résistances post-fissuration caractéristiques f_{ctfk} avec les résistances élastiques en traction $f_{ctk,el}$ permet de classer les BFUP étudiés en classe T2 peu écrouissant au sens de la norme (PR NF P18-470). En effet, ces bétons présentent un comportement écrouissant en traction pour la courbe moyenne ($f_{ctfm} \geq f_{ctm,el}$), et adoucissant en traction pour la courbe caractéristique ($f_{ctfk} < f_{ctk,el}$), avec la prise en compte de l'orientation des fibres et de leur dispersion via le coefficient K_{global} .

Outre la classification des matériaux, ces résultats permettent de confronter les performances en traction des différentes formulations. Nous pouvons constater que les BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK présentent le meilleur comportement en traction parmi les 4 BFUP étudiés. Leur résistance limite d'élasticité de traction est de 8,0 MPa en valeur caractéristique, et la résistance post-fissuration est de 7,0 MPa pour 880-2%-FS et de 6,6 MPa pour 880-2%-MK. Ces performances élevées en traction ont été obtenues grâce à l'utilisation des additions pouzzolaniques, à l'amélioration de la compacité, et à une fraction volumique de fibres métalliques de 2%. On peut noter que la formulation avec métakaolin 880-2%-MK optimisée à l'aide de l'essai de compacité humide et de la prise en compte de l'eau absorbée permet d'obtenir un comportement en traction très proche de celui de la formulation quasi équivalente et plus classique du BFUP avec fumée de silice 880-2%-FS.

La comparaison des résultats obtenus entre les BFUP étudiés permet également d'identifier les effets des paramètres de formulations.

- Effet de la compacité et de la quantité de liant

Le comportement en traction peut être influencé par la compacité du mélange. On considère notamment que la résistance limite d'élasticité caractéristique de traction $f_{ctk,el}$, valeur de contrainte qui caractérise la perte de linéarité et l'ouverture des premières microfissures, traduit la résistance en traction de la matrice cimentaire. En effet, la compacité régit l'apparition de la microfissuration puisque celle-ci s'initie au niveau des zones de

moindre résistance, des « points faibles » qui correspondent très souvent à des macropores de la matrice, éventuellement des bulles d'air entraîné, ou des défauts de mise en place, etc. Les résultats obtenus pour le 680-2%-MK permettent de mettre en évidence cet effet. Il est rappelé que cette formule présente une teneur en liant plus faible et un volume de sable plus important que les autres BFUP. Malgré la même fraction volumique de fibres de 2% que celles des deux formulations à 880 kg de ciment, ce béton présente une résistance limite d'élasticité moindre (5,9 MPa par rapport à 8,0 MPa).

Durant la phase post-fissuration, on constate également une plus faible valeur de la résistance caractéristique qui est de 4,0 MPa pour le 680-2%-MK, à comparer au 7,0 MPa du 880-2%-MK et au 6,6 MPa du 880-2%-FS de même dosage en fibres. Et ce, alors que l'on pourrait postuler que la quantité de fibres, leur orientation et donc leur capacité à reprendre les efforts de traction au droit de la fissure sont similaires. On peut donc en déduire que la compacité liée à la quantité de liant conditionne de manière significative la qualité de l'interface fibre-matrice et l'ancrage des fibres, et donc la résistance post-fissuration.

- **Effet de la teneur en fibres métalliques**

Il est bien connu que le comportement en traction des BFUP est fortement dépendant de la teneur en fibres métalliques. L'augmentation de ce dosage permet une amélioration significative du comportement en traction. Ceci a été démontré par de nombreux auteurs (Boulay et al., 2004), (Rossi et al., 2005), (Markovic, 2006), (Pyo et al., 2015). Dès le début de l'étude, le dosage volumique maximal en fibres a été fixé à 2% en s'appuyant sur les données bibliographiques qui mettent en évidence qu'il s'agit de la valeur optimale en terme de rapport performance/coût, conformément aux critères de notre cahier des charges. Nous rappelons également que cette quantité de fibres est considérée comme minimale pour satisfaire le critère de ductilité selon (AFGC, 2013).

La confrontation entre les deux BFUP 880-2%-MK et 880-1,5%-MK, qui ne se distinguent que par leur dosage en fibres, permet d'analyser son effet sur le comportement en traction. La réduction de la fraction volumique de fibres de 2% à 1,5% engendre une diminution de 2 MPa de la résistance caractéristique élastique $f_{ctk,el}$ et de la résistance caractéristique post-fissuration f_{ctfk} . La diminution de la résistance limite d'élasticité caractéristique démontre une capacité de reprise des effets de traction du BFUP 880-1,5%-MK moins importante que celle de 880-2%-MK. Lors des essais de flexion 4 points sur ces

mêmes types d'éprouvettes, nous avons observé une phase de multifissuration pour le BFUP 880-2%-MK avant la localisation de la macrofissure, traduisant une reprise des efforts de traction par les fibres présentes dans la matrice pour des contraintes plus faibles que celle de la résistance d'élasticité en traction. Or, cette phase de multifissuration n'a pas été observée dans le cas du BFUP 880-1,5%-MK. Par conséquent, lorsque des microfissures s'initient pour un dosage de 1,5%, la propagation est très rapide à cause de l'action limitée des fibres moins nombreuses, et la macrofissure se forme sans phase de multi-fissuration. La contrainte chute immédiatement, contrairement au cas d'un dosage à 2% où elle continue à augmenter jusqu'au pic de la résistance d'élasticité en traction. Ce fonctionnement explique la réduction de la valeur de cette caractéristique. La forte chute de la résistance caractéristique post-fissuration f_{ctfk} est également attribuable à la plus faible capacité des fibres, en nombre plus restreint, à reprendre les efforts de traction.

Toutefois, il est important de relever que la réduction de 2% à 1,5% de la fraction volumique en fibres est moins pénalisante sur le comportement en traction que la diminution de la quantité de liant de 200 kg de ciment. En effet, par rapport au BFUP à la formule 880-2%-MK, les chutes de la résistance élastique et de post-fissuration sont respectivement de 2 MPa pour 880-1,5%-MK, et 2,1 MPa et 2,6 MPa pour 680-2%-MK.

4.2.2.4.2. Caractérisation du comportement en traction par les essais de traction directe

Malgré leur difficulté de mise en œuvre, nous avons également entrepris de réaliser des essais de traction directe afin de vérifier la concordance des résultats contrainte-ouverture de fissure avec ceux déterminés par analyse inverse à partir des essais de flexion. Compte tenu de cet objectif de comparaison, nous nous sommes limités au cas d'un seul BFUP, à savoir la formulation 880-2%-MK qui paraît la plus intéressante du point de vue rapport performance/coût d'après les résultats préliminaires.

Les essais de traction directe ont été réalisés à 90 jours sur trois échantillons. La réponse en traction uniaxiale du BFUP 880-2%-MK est présentée sur la Figure 4 – 18.

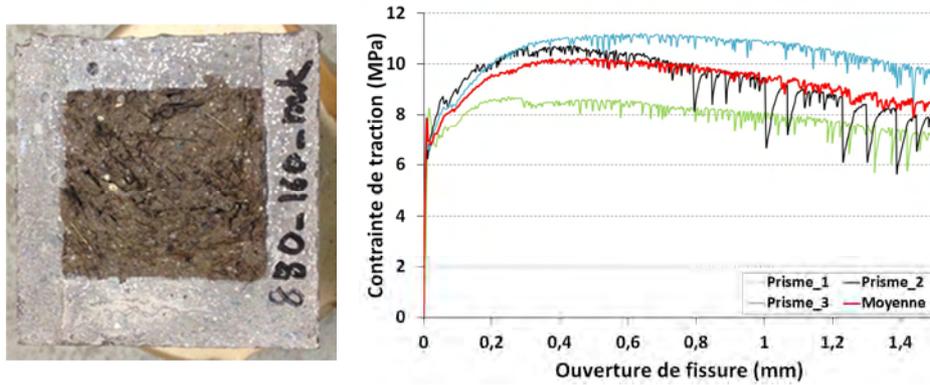


Figure 4 – 18 : Aspect de l'échantillon après rupture et courbes contrainte de traction – ouverture de fissure pour le béton 880-2%-MK obtenues lors d'essais de traction directe

Sur la base des résultats obtenus, nous constatons une plus grande dispersion des réponses « contrainte de traction-ouverture de fissure » par rapport aux essais de flexion. Ceci provient de la répartition non homogène des fibres d'une éprouvette à l'autre lors de leur confection. La contrainte est déterminée en rapportant l'effort mesuré à la surface de la section de rupture qui s'est bien produite, pour tous les essais, au niveau de l'entaille comme prévue. Les courbes « contrainte-ouverture de fissure » tracées permettent d'identifier un comportement écrouissant en loi moyenne en traction directe du BFUP testé. Ce comportement est caractérisé par une contrainte reprise par la section fissurée supérieure à celle correspondant à l'apparition de la microfissuration.

La loi de comportement caractéristique est déterminée selon la relation (4 – 4) :

$$f_{ctk}(w) = f_{ctm}(w) - \text{coefficient de Student} \times \text{écart type} \quad (4 - 4)$$

Avec $f_{ctm}(w)$ la contrainte en traction moyenne en fonction de l'ouverture de fissure.

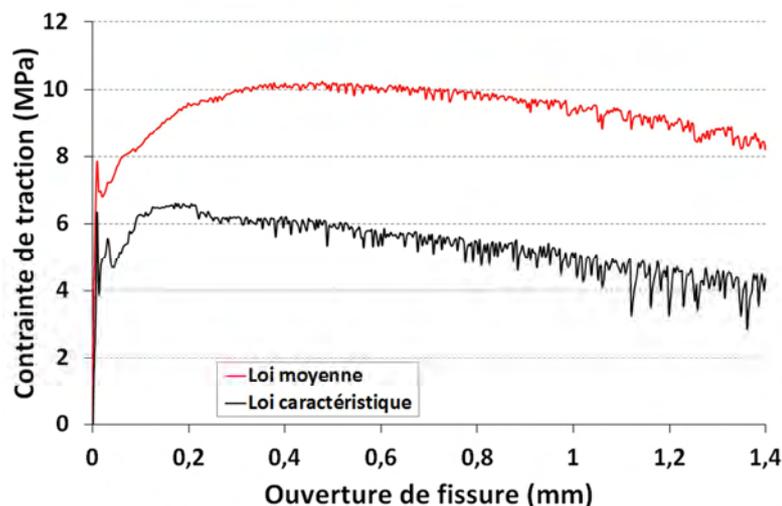


Figure 4 – 19 : Loi de comportement moyenne et caractéristique en traction directe du béton 880-2%-MK

Les valeurs moyennes et caractéristiques des paramètres de traction déterminées à partir de ces courbes sont compilées dans le Tableau 4 – 10.

Tableau 4 – 10 : Valeurs moyennes et caractéristiques des paramètres de traction calculés à partir des courbes des essais de traction directe et de traction par flexion

Paramètres	Valeurs obtenues en traction directe (MPa)	Valeurs obtenues en flexion (MPa)
$f_{ctm,el}$	7,8	8,9
$f_{ctk,el}$	6,4	8,0
f_{ctfm}	10,2	10,4
f_{ctfk}	6,6	6,6

A partir des résultats obtenus, quelques conclusions peuvent être émises :

- En loi moyenne, le BFUP testé présente un comportement écrouissant en traction directe, avec une résistance élastique en traction de 7,8 MPa, et une résistance maximale post-fissuration moyenne de 10,2 MPa ;
- En loi caractéristique, avec la prise en compte de l'orientation des fibres et de leur dispersion via un coefficient K_{global} pris égal à 1,25, le BFUP testé est caractérisé par une résistance post-fissuration caractéristique de 6,6 MPa, qui est légèrement supérieure à la résistance élastique en traction de 6,4 MPa. Selon la norme (PR NF P18-710), les BFUP ayant un comportement écrouissant en loi moyenne et en loi caractéristique peuvent être classés en classe T3 très écrouissants. Dans le cas de cet essai de traction directe, on constate donc que ce BFUP a un comportement écrouissant de classe T3 alors qu'il n'était qu'en classe T2 écrouissant adoucissant d'après la loi de comportement en traction déduite par analyse inverse de l'essai de flexion. Bien que ce BFUP se situe en T3, on peut toutefois relever qu'il se situe à la frontière avec la classe T2.

Si l'on compare les paramètres qui caractérisent le comportement en traction obtenus à partir des deux types d'essais, on constate que les valeurs moyennes et caractéristiques de la résistance élastique issues de l'essai de traction directe sont plus faibles. Ce résultat est en accord avec les recommandations (AFGC, 2002, 2013) qui souligne que les essais de traction directe sur éprouvettes entaillées sont très pénalisants et pas forcément représentatifs du comportement du matériau dans la structure. C'est pourquoi nous n'utiliserons et n'exploiterons que les données obtenues sur essais de flexion dans le reste de notre étude.

4.2.2.4.3. Bilan des résistances en compression et en traction des bétons étudiés

Le Tableau 4 - 11 présente une synthèse des valeurs moyennes et caractéristiques des résistances en compression et en traction par flexion des bétons étudiés. Il est rappelé que ces bétons n'ont subi aucun traitement thermique.

Tableau 4 - 11 : Synthèse des valeurs moyennes et caractéristiques de résistance en compression et en traction par flexion des bétons étudiés

	Caractéristiques	880-2%-FS	880-2%-MK	880-1,5%-MK	680-2%-MK
Compression	f_{cm} (MPa)	153	154	136	134
	f_{ck} (MPa)	150	152	131	130
	E_{cm} (GPa)	47	45	42	44
	ν	0,2	0,2	0,2	0,2
Classement en compression (PR NF P18-470)		BFUP-S	BFUP-S	BFUP-Z	BFUP-Z
Traction	$f_{ctm,el}$ (MPa)	8,4	8,6	6,1	6,0
	$f_{ctk,el}$ (MPa)	8,0	8,0	6,0	5,9
	f_{ctfm} (MPa)	8,4	8,9	6,1	6,0
	f_{ctfk} (MPa)	7,0	6,6	4,6	4,0
Classement en traction (PR NF P18-470)		T2	T2	T2	quasiment T2

Conformément à la prénorme matériau (PR NF P18-470), les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK sont de classe BFUP-S vis-à-vis de leur comportement en compression, et de classe T2 pour leur comportement en traction. La formule 880-1,5%-MK appartient à la classe BFUP-Z pour son comportement en compression et T2 pour son comportement en traction. Quant à la formule 680-2%-MK, elle peut être classée en tant que BFUP-Z au sens de la prénorme (PR NF P18-470) ; néanmoins sa résistance élastique en traction obtenue est légèrement inférieure à celle exigée.

Un bilan de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques instantanées peut être proposé :

- En compression : la comparaison entre les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK montre que l'utilisation du métakaolin en substitution de la fumée de silice dans les BFUP est judicieuse. Des valeurs caractéristiques en compression équivalentes, voire légèrement supérieures, ont été obtenues, grâce à l'optimisation de la compacité de la formule avec métakaolin et la prise en compte de son absorption d'eau. Par rapport à la formule optimisée à base de métakaolin 880-2%-MK, la réduction de la teneur en liant avec le même dosage en fibres de 680-2%-MK provoque une diminution de la résistance caractéristique en compression de 14,5% à 28 jours, alors que la réduction du dosage en

fibres dans la formule 880-1,5%-MK provoque une chute de résistance caractéristique en compression de 13,8% à la même échéance.

- En traction : l'influence des paramètres de formulation sur le comportement en traction est similaire à celle en compression. La nature des additions impacte peu le comportement en traction des formules 880-2%-FS et 880-2%-MK puisque les valeurs caractéristiques de la résistance élastique et de la résistance post-fissuration sont très proches. En revanche, par rapport à la formule optimisée à base de métakaolin, la réduction de la teneur en liant provoque une chute des résistances caractéristiques élastiques et de post-fissuration de 26,2% et de 39,4% respectivement. La réduction de la teneur en fibres de la formule 880-1,5%-MK tend à diminuer également les résistances caractéristiques en traction, mais avec des amplitudes plus faibles de 25% pour la résistance élastique et de 30,3% pour la résistance post-fissuration.

4.2.3. Comportement mécanique différé

L'évaluation des phénomènes de retrait et de fluage fait partie des informations indispensables pour la carte d'identité du matériau, et est demandée par (AFGC, 2013). Nous avons étudié le comportement différé libre de retrait pour l'ensemble des BFUP dès le démoulage des éprouvettes à 24 heures. Le comportement différé sous charge de fluage a été étudié pour les deux BFUP de performances mécaniques les plus élevées, et également très proches, 880-2%-FS et 880-2%-MK. Les valeurs considérées comme acceptables pour un BFUP par (AFGC, 2013) sont de 750 $\mu\text{m}/\text{m}$ vis-à-vis des déformations de retrait total, dont une part endogène de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$, et le coefficient de fluage des BFUP sans traitement thermique, comme dans le cas de nos matériaux, doit être de 0,8.

4.2.3.1. Déformations de retrait

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats expérimentaux des déformations de retrait. Deux séries ont été étudiées. Sur la première, les mesures ont été enregistrées à partir de 24 heures, dès démoulage des échantillons. La seconde a été étudiée en parallèle des essais de fluage dont le chargement est appliqué après une cure endogène de 29 jours. Durant l'essai de fluage, les déformations différées sous charge mesurées sont conventionnellement considérées comme la somme du retrait et du fluage, en faisant l'hypothèse que les effets sont découplés. Cette seconde série permet donc de déterminer les déformations de fluage en déduisant la part de retrait des déformations différées mesurées sous charge. Les pertes de masses dues au séchage sont également suivies sur toutes les éprouvettes de retrait.

4.2.3.1.1. Déformations de retrait et pertes de masse d'eau mesurées à partir de 24 heures

4.2.3.1.1.1. Déformations de retrait

Les courbes présentées sont les courbes moyennes. L'origine des temps correspond au début de la mesure, soit 24 heures après le coulage. Nous rappelons que le retrait dit de dessiccation, ou de séchage, correspond à la différence entre le retrait total et le retrait endogène.

La Figure 4 – 20 présente l'évolution des déformations de retrait de l'ensemble des BFUP étudiés.

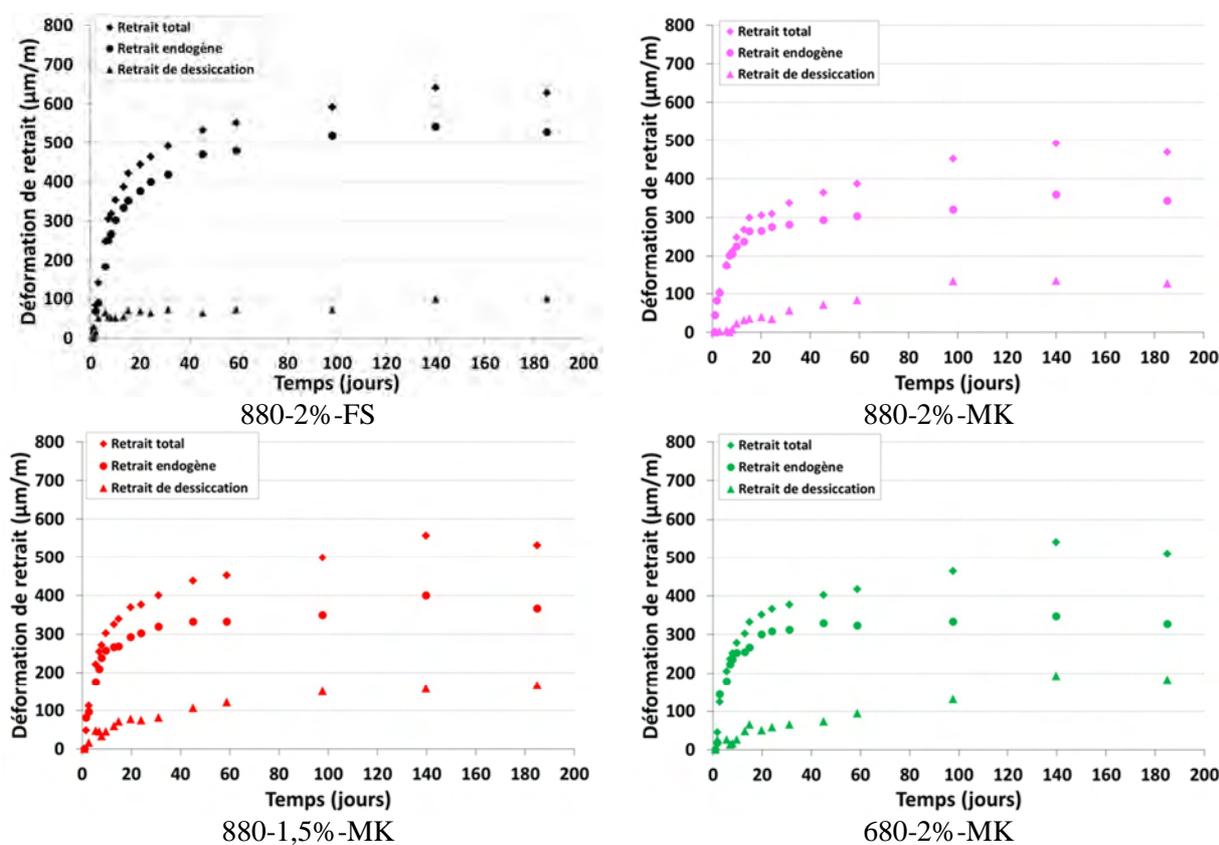


Figure 4 – 20 : Evolution des déformations de retrait des différents BFUP

L'étude bibliographique du chapitre 1 a montré que le retrait des BFUP est essentiellement un retrait endogène avec une cinétique d'évolution très rapide au jeune âge. (Loukili, 1996), (Habel, 2004), (Kamen, 2007) ont constaté que le retrait endogène des BFUP est très élevé.

Les valeurs de retrait obtenues à 185 jours pour nos BFUP sont récapitulées dans le Tableau 4 – 12.

Tableau 4 – 12 : Valeurs des retraits obtenues à 185 jours pour les différents BFUP

Formule	Retrait total ($\mu\text{m/m}$)	Retrait endogène ($\mu\text{m/m}$)	Retrait de dessiccation ($\mu\text{m/m}$)
880_2%_FS	611	528	87
880_2%_MK	424	343	125
880_1,5%_MK	532	366	166
680_2%_MK	511	328	183

Sur la base des résultats obtenus, nous constatons que l'amplitude du retrait total des éprouvettes est de 611 $\mu\text{m/m}$ pour 880-2%-FS, et de 424 $\mu\text{m/m}$ à 532 $\mu\text{m/m}$ pour les BFUP à base de métakaolin, dont une part de retrait endogène de 528 $\mu\text{m/m}$ et de 328 $\mu\text{m/m}$ à 366 $\mu\text{m/m}$ respectivement. Ces résultats sont concordants avec les valeurs de 750 $\mu\text{m/m}$ de retrait total et de 500 $\mu\text{m/m}$ en endogène de (AFGC, 2013). Pour tous les BFUP étudiés, le retrait de dessiccation peut être qualifié de faible en comparaison avec celui des bétons ordinaires (environ 400 $\mu\text{m/m}$).

Le retrait total est donc constitué d'une part importante de retrait endogène. Ceci peut être attribué au rapport E/C extrêmement faible, autour de 0,20, à l'origine d'une porosité très fine avec des tailles de pores petites. Il en résulte d'intenses dépressions capillaires dues à l'autodessiccation qui engendre cet important retrait endogène à la cinétique particulièrement élevée durant la phase d'hydratation au jeune âge. Ces résultats confirment la tendance observée par (Loukili, 1996), (Habel, 2004), (Kamen, 2007). Le retrait de dessiccation est, lui, plus modéré. La quantité d'eau libre est très faible compte tenu du faible rapport E/C de ces matériaux. De plus, le séchage lié au gradient hydrique entre le matériau et le milieu ambiant à 50% HR est limité par un réseau poreux probablement peu développé, segmenté et fin. On peut ainsi observer qu'il demeure faible, 87 et 125 $\mu\text{m/m}$ à 185 jours respectivement pour les deux BFUP les plus performants 880-2%-FS et 880-2%-MK.

De manière globale, le BFUP 880-2%-FS développe des amplitudes de retrait total et endogène plus intenses que celles des formulations avec métakaolin. En revanche, le retrait de dessiccation du 880-2%-FS (87 $\mu\text{m/m}$) est plus faible que celui des BFUP qui incorporent du métakaolin (de 125 $\mu\text{m/m}$ à 183 $\mu\text{m/m}$). On pourrait expliquer ce résultat de la même manière que lorsqu'on compare le retrait endogène plus élevé et le retrait de dessiccation inférieur d'un BHP par rapport à un béton ordinaire. Le réseau poreux du BFUP avec fumée de silice pourrait être plus fin et être caractérisé par des rayons de pores réduits, qui induiraient des contraintes de contraction de retrait endogène supérieures. Ce réseau poreux pourrait être aussi moins connecté, ce qui atténuerait le retrait de dessiccation.

La confrontation entre les BFUP 880-2%-MK et 880-1,5%-MK montre qu'un dosage supérieur en fibres peut contribuer à la réduction de retrait. Ce constat a été mis en évidence par (Kamen, 2007) qui explique ce phénomène par le fait que les fibres peuvent s'opposer et empêcher les microdéformations de la matrice. Dans notre cas, nous avons noté une réduction de 20% environ du retrait total et de 17,5% du retrait endogène pour la formule 880-2%-MK qui contient davantage de fibres par rapport à la formule 880-1,5%-MK. Ce résultat est aussi en accord avec les tendances observées par (Loukili, 1996), (Cheyrezy et Behloul, 2001) et (Kanellopoulos, 2004), qui ont noté une réduction de 57% du retrait endogène sur leur BFUP nommé CARDIFRC entre les échantillons sans et avec fibres.

4.2.3.1.1.2. Pertes de masse

La perte de masse d'eau a été suivie par pesée régulière des échantillons de retrait avec une balance de précision 0,01g, afin de vérifier, d'une part, l'étanchéité des éprouvettes en conditions endogène, et d'autre part d'établir le lien avec le retrait de dessiccation obtenu à partir du suivi des déformations sur les éprouvettes de retrait total. Les variations de masse en fonction du temps et les évolutions du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse sont présentées sur la Figure 4 – 21. Le séchage des éprouvettes en endogène est négligeable et n'est donc pas représenté.

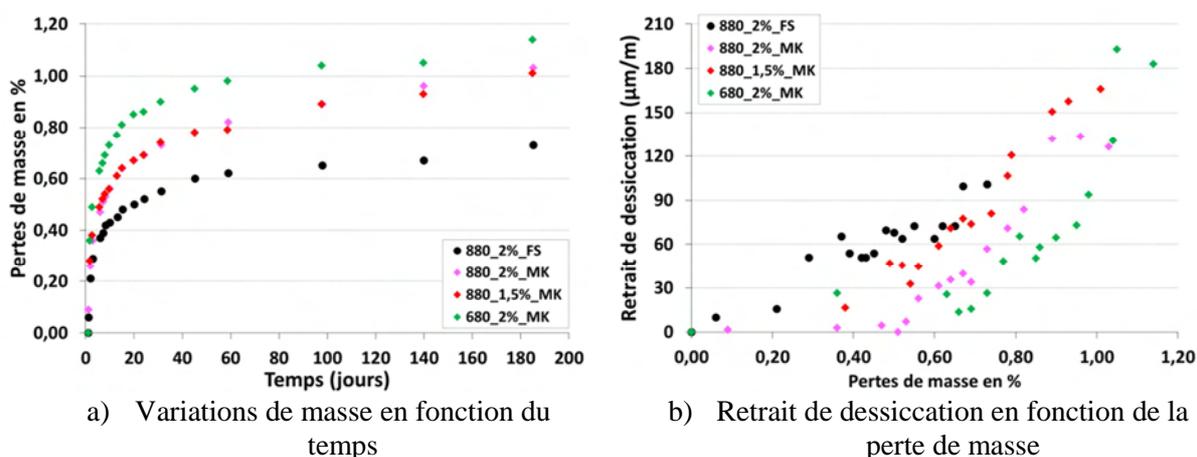


Figure 4 – 21 : a) Perte de masse en fonction du temps ; b) Retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse des quatre BFUP

Sur la Figure 4 – 21a, nous pouvons constater que les cinétiques des pertes de masse induites par le séchage des échantillons sont très importantes au jeune âge. Durant cette phase, l'eau est encore en partie non liée, les réactions d'hydratation se développent, mais la porosité reste encore élevée, développée et interconnectée facilitant ainsi le départ d'eau libre, d'autant plus que le gradient hydrique entre le matériau et le milieu ambiant est important. Avec

l'avancement de l'hydratation, la quantité d'eau libre diminue par auto-dessiccation, l'humidité interne chute, et le matériau se densifie, réduisant la diffusion de l'eau à travers un réseau poreux désormais plus segmenté et fin. Une stabilisation est constatée à partir de 90 jours. La confrontation entre les courbes montre que les BFUP contenant le métakaolin présentent une perte de masse supérieure à celle du BFUP avec fumée de silice. On peut rappeler, pour expliquer ce résultat, que la quantité d'eau initiale des bétons avec métakaolin est supérieure à celle de la formulation avec fumée de silice. L'hypothèse d'une porosité ouverte plus interconnectée et moins fine des bétons à base de métakaolin peut aussi être avancée.

L'analyse du graphe entre le retrait de dessiccation et la perte de masse permet de distinguer 3 phases :

- La première phase correspond à une évolution lente du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse. Ceci signifie qu'une perte de masse dont les valeurs sont comprises entre 0,25% et 0,5% n'induit pas de déformations de retrait de dessiccation. Elle peut être due au séchage des défauts de surface des éprouvettes, comme des bulles de dimension suffisamment grande pour ne pas engendrer de dépressions capillaires. On peut également avancer une microfissuration du béton de peau liée au fort gradient hydrique au début de séchage, qui se produirait peut-être entre le démoulage et le démarrage des mesures de retrait, ce qui relaxerait le matériau et s'opposerait aux contractions pendant cette première phase de séchage. On peut d'ailleurs constater quelques variations de déformations pour des valeurs inférieures à 0,25% de perte de masse, notamment pour le 880-2%-FS.
- La deuxième phase correspond à une évolution qui peut être considérée comme linéaire entre le retrait de dessiccation et la perte de masse. Elle débute lorsque les tensions capillaires dans les pores, liées au séchage par gradient hydrique avec le milieu ambiant, sont suffisamment développées pour contracter l'éprouvette. La perte d'eau est alors gouvernée par la perméabilité du matériau. Il est intéressant de constater que les pentes des points expérimentaux des différentes BFUP sont quasiment identiques, révélant que le phénomène à l'origine du retrait de dessiccation semble bien similaire pour les quatre BFUP.
- La troisième phase correspond à une stabilisation du retrait de dessiccation alors que les évolutions des pertes de masse d'eau se poursuivent. Elle provient généralement de l'apparition de la microfissuration liée à un effet de structure qui se produit lorsque le

retrait de dessiccation en surface est tel qu'il devient empêché par celui plus faible au cœur du matériau. Il en résulte des contraintes de traction en surface pouvant entraîner cette microfissuration qui va dès lors relaxer le matériau au niveau macroscopique. Cette phase est difficilement observable dans le cas de nos BFUP, le retrait de dessiccation et le séchage demeurant faibles.

4.2.3.1.2. Déformations de retrait et pertes de masse d'eau mesurées à partir de 29 jours

4.2.3.1.2.1. Déformations de retrait

Durant cette deuxième série de mesures de retrait, les déformations de retrait en cure endogène sont mesurées à partir de 48h jusqu'à 29 jours. A l'échéance de 29 jours, date de mise en charge de fluage, 3 éprouvettes ont été mises en séchage, et 3 autres ont été laissées en endogène, afin de suivre respectivement les retraits total et endogène. Ces déformations de retrait mesurées en parallèle des essais de fluage pourront ainsi être retranchées à celles mesurées sous charge pour en déduire les déformations de fluage. Etant donné que les essais de fluage n'ont été menés que sur les formulations les plus performantes, à savoir 880-2%-FS et 880-2%-MK, les évolutions de retrait à partir de 29 jours après cure endogène n'ont également été suivies que sur ces mêmes matériaux.

La Figure 4 – 22 présente les évolutions du retrait des BFUP pendant et après la cure endogène. Les courbes présentées correspondent aux courbes moyennes des résultats obtenus sur 3 éprouvettes. L'origine des temps des courbes correspond au début de la mesure, soit 48 heures après le coulage.

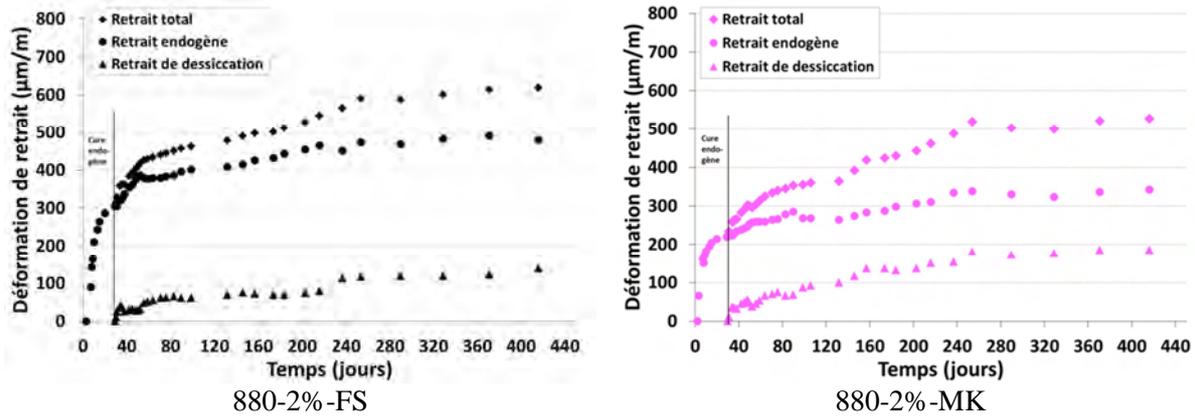


Figure 4 – 22 : Evolution des retraits endogène, total, et de dessiccation des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK

Pendant la cure endogène, comme lors des résultats du précédent programme de retrait, les cinétiques d'évolution sont élevées au jeune âge. Nous constatons que l'amplitude du retrait total des éprouvettes ayant subi une cure totale est de 618 $\mu\text{m/m}$ pour 880-2%-FS, et de 528 $\mu\text{m/m}$ pour 880-2%-MK, à 415 jours, dont une part de retrait endogène de 479 $\mu\text{m/m}$ et de 343 $\mu\text{m/m}$ respectivement. De manière globale, le BFUP 880-2%-FS développe des amplitudes de retraits total et endogène plus importantes que celles du BFUP 880-2%-MK. En revanche, le retrait de dessiccation du 880-2%-FS, environ 139 $\mu\text{m/m}$, est plus faible que celui de 880-2%-MK, d'environ 185 $\mu\text{m/m}$. Le retrait de dessiccation de ces deux BFUP demeure faible par rapport à celui des bétons ordinaires à E/C plus élevé (autour de 400 $\mu\text{m/m}$).

Une confrontation des valeurs de retrait endogène obtenues durant cette étude avec celles issues d'études antérieures sur des BFUP sans traitement thermique est présentée dans le Tableau 4 – 13. Puisque les mesures de la série 2 ont été démarrées à 48 heures après le coulage, les valeurs obtenues entre 24 et 48 heures pour la première série ont été additionnées à celles finales du retrait endogène de cette deuxième série.

Tableau 4 – 13 : Comparaison du retrait endogène de différents BFUP sans traitement thermique

Produits	Retrait endogène ($\mu\text{m/m}$)	Echéances (jours)	Référence
BPR	440	90	(Cheyrezy et Behloul, 2001)
Ductal®	500	365	(Loukili, 1996),
CEMTEC®	542	365	(Kamen, 2007)
880-2%-FS	579	415	Série 2
880-2%-MK	343	415	

Cette comparaison permet de confirmer que les valeurs de retrait endogène obtenues pour nos BFUP sont inférieures à celles de la bibliographie. En particulier, le BFUP contenant du métakaolin présente un retrait endogène plus faible. (Brooks et Johari, 2001) ont notamment montré sur des bétons ordinaires que l'incorporation du métakaolin en substitution partielle du ciment (de 5 à 15%) contribue à diminuer le retrait endogène. Une autre étude plus récente de (Güneyisi et al., 2012) a mis en évidence que les valeurs de retrait de BHP de rapport E/C = 0,35 avec du métakaolin à 15% de la masse de ciment sont légèrement plus faibles que celles des BHP avec fumée de silice à taux identique. Pour les BFUP, (Tafraoui, 2009) a également montré que le retrait endogène des formules avec fumée de silice est plus élevé que celui des formules avec métakaolin. (Wild et al., 1998) ont expliqué que, pour des taux d'incorporation élevés de métakaolin supérieur à 15% en masse de ciment comme dans notre cas, les hydrates de type stratlingite sont formés à la place des aluminates tétracalciques hydratés, ce qui engendre une augmentation du volume total des hydrates, compensant ainsi le retrait endogène.

Les amplitudes des retraits à 415 jours de ces deux BFUP sont conformes aux valeurs limites considérées par (AFGC, 2013) et par la prénorme (PR NF P18-470) pour le retrait endogène, soit 550 $\mu\text{m}/\text{m}$, et pour le retrait total, 750 $\mu\text{m}/\text{m}$. Enfin, on peut constater également que le retrait de dessiccation du BFUP à base de métakaolin, qui atteint environ 185 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 415 jours, correspond à approximativement le double de celui du BFUP avec fumée de silice quelle que soit l'échéance.

En ce qui concerne la cinétique de développement, les résultats montrent une évolution rapide du retrait endogène au jeune âge, avec environ 30% à 45% de la valeur obtenue à 415 jours atteint en seulement 7 jours. Ce phénomène peut être attribué au développement rapide de la microstructure au jeune âge et à la modification du réseau poreux, en particulier la diminution du rayon moyen des pores qui induit une forte augmentation des tensions capillaires, d'autant plus que le rapport E/C est faible. La consommation d'eau par les réactions d'hydratation entraîne une autodessiccation et une réduction de l'humidité interne qui accentue les dépressions capillaires qui serait à l'origine de cette cinétique élevée du retrait au jeune âge. La cinétique de retrait ralentit à long terme, au-delà de 90 jours, du fait que l'hydratation et les réactions pouzzolaniques tendent à se stabiliser ainsi que le réseau poreux et l'humidité interne.

4.2.3.1.2.2. Pertes de masse

La perte de masse a été suivie par pesée régulière des échantillons avec la même balance de précision 0,01g que celle utilisée pour les éprouvettes de la première série d'essais de retrait. Les variations de masse en fonction du temps, et les évolutions du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse sont présentées sur la Figure 4 – 23.

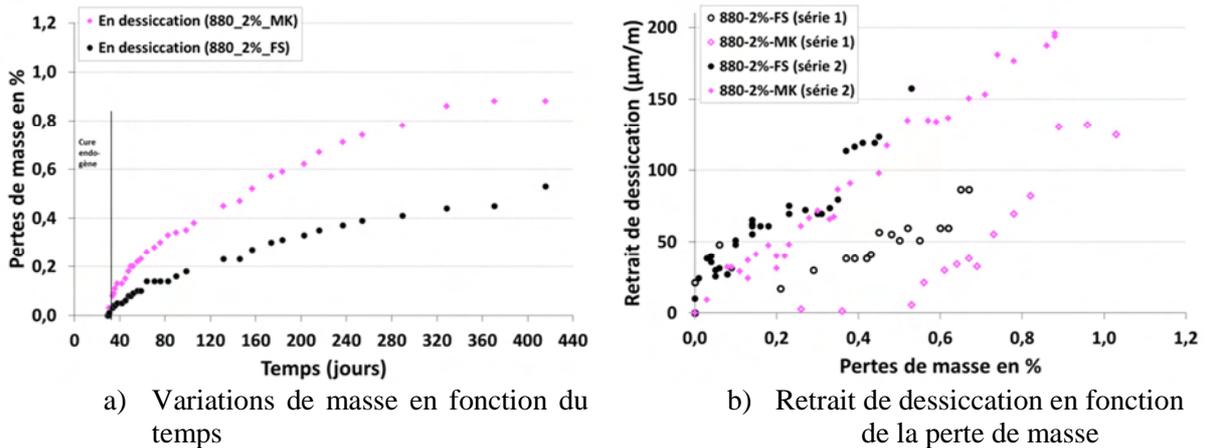


Figure 4 – 23 : a) Perte de masse en fonction du temps ; b) Retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse des BFUP 880_2%_FS et 880_2%_MK

Durant les 29 jours de la cure endogène, aucune perte de masse n'a été notée pour l'ensemble des éprouvettes. Dès la mise en dessiccation, les pertes de masse augmentent avec une forte cinétique. La confrontation entre les données des deux BFUP montre une perte de masse plus intense pour le BFUP avec métakaolin, ce qui explique son retrait de dessiccation supérieur. (Güneyisi et al, 2012) a également montré une perte de masse plus intense dans le cas des BHP (à même rapport E/C) contenant du métakaolin en comparaison avec ceux à base de fumée de silice. Ceci peut être attribué au réseau poreux du BFUP avec métakaolin qui serait moins fin que celui avec fumée de silice, induisant un séchage plus important.

La Figure 4 – 23b présente la relation entre le retrait de dessiccation et la perte de masse pour les deux bétons. Sur la base de ces résultats, nous pouvons constater que la première phase correspondant à une évolution lente du retrait de dessiccation, est inexistante dans cette série d'essai. Ceci peut provenir de la cure endogène de 29 jours avant la mise en dessiccation des éprouvettes. Par conséquent, si l'on reprend les hypothèses avancées pour expliquer cette phase, l'eau de surface contenue dans les bulles ou macropores a probablement été consommée, au moins en partie, par les réactions d'hydratation durant la cure endogène, et/ou s'est diffusée, sous l'effet de gradient hydrique, vers des zones séchées par autodessiccation. La microfissuration du béton de peau liée au fort gradient hydrique au début du séchage

pourrait ne plus apparaître du fait de la forte autodessiccation engendrée par les réactions d'hydratation, comme le met en évidence les résultats de retrait endogène dont la majeure partie se produit durant ce premier mois après coulage. Dès lors, le gradient hydrique avec le milieu ambiant et le phénomène de retrait empêché entre le cœur et la surface serait limité à l'issue de cette cure endogène.

Dès la mise en dessiccation des éprouvettes, nous pouvons remarquer une évolution linéaire du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse. Cette phase correspond exactement à celle mise en évidence lors de la première série d'essai de retrait et a été également observée pour d'autres types de bétons, mais surtout dans le cas des BFUP par (Francisco, 2012), (Kamen, 2007). Ce résultat est particulièrement intéressant puisque la superposition des résultats de la première série montre que la pente est quasiment identique pour les deux BFUP quelle que soit la cure initiale. Il démontre que, même si le réseau poreux des deux BFUP est éventuellement différent, comme nous en avons avancé l'hypothèse, la perte de masse d'eau régit de la même manière leur retrait de dessiccation. Seule l'amplitude finale, vers laquelle on tend lorsque l'on assèche les matériaux, diffère, vraisemblablement du fait que la quantité d'eau libre initiale disponible ne soit pas la même dans les deux BFUP. Il serait dès lors intéressant de sécher totalement les matériaux à l'issue des essais pour en déduire la quantité d'eau disponible réelle, de confronter les valeurs pour ces deux BFUP et de retracer les graphes non pas en pertes de masses absolues, mais relatives par rapport à la l'eau libre totale.

Après cette phase, l'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse semble se stabiliser. Ceci peut être dû à une diminution des forces de contraction (Benboudjema, 2002) ou à une microfissuration générée par la dessiccation.

4.2.3.2. Déformations différées sous charge - fluage en compression

Cette partie est consacrée aux résultats des essais de fluage en compression uniaxiale de deux BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK les plus résistants en compression et traction. Les essais de fluage ont été réalisés sur les éprouvettes cylindriques de 11,8 cm de diamètre et de 22,5 cm de hauteur, conditionnées en cure endogène pendant 29 jours. Au bout de 29 jours, trois éprouvettes ont été chargées tout en étant libres de sécher pour évaluer le fluage total, et trois autres ont été maintenues chargées en endogène pour les mesures de fluage endogène que l'on appelle fluage propre. Le Tableau 4 – 14 détaille les paramètres déterminés lors de la mise en charge des éprouvettes.

Tableau 4 – 14 : Paramètres nécessaires à l'interprétation des essais de fluage

Formulation	880-2%-FS	880-2%-MK
Cure	endogène	endogène
Age de chargement (jours)	29	29
f_{cm} (MPa)	145	146
Module d'élasticité (GPa)	42	42
Taux de chargement (% f_{cm})	23,7	23,4
Contrainte (MPa)	34,5	34,5

Compte tenu des résistances élevées des matériaux à 29 jours et de la capacité du système hydraulique, nous avons imposé une pression de 120 bars. Cette valeur de pression entraîne l'application d'une contrainte de compression de 34,5 MPa, ce qui correspond à un taux de chargement modéré quasiment identique pour les deux BFUP de 23,7% et 23,4%. Nous pouvons remarquer que le mode de cure produit un léger impact sur les résistances en compression. En effet, elles sont réduites de 6 MPa et 9 MPa respectivement pour les BFUP 880-2%-MK et 880-2%-FS par rapport aux valeurs après cure humide. Ce résultat est assez conforme avec l'analyse de l'effet de la cure sur les propriétés mécaniques réalisée dans le chapitre 2.

Pendant l'essai de fluage, les déformations totales sous charge sont enregistrées. Une première déformation élastique instantanée se développe lors de la mise en charge. Puis, les déformations différées, correspondant aux déformations de retrait et de fluage, se développent. Elles sont déterminées en retranchant la part élastique des déformations totales sous charge. En se basant sur la décomposition conventionnelle des déformations différées sous charge en une part de retrait et de fluage, la déformation de fluage est déduite de la déformation différée sous charge en retranchant le retrait mesuré à partir de 29 jours. Nous présentons dans cette partie tout d'abord les modules d'élasticité estimés lors de la mise en charge, puis les évolutions des déformations différées sous charge, ainsi que les résultats de fluage spécifique qui correspond à la déformation de fluage rapportée à la contrainte appliquée.

4.2.3.2.1. Modules d'élasticité lors de la mise en charge

Les valeurs de modules d'élasticité estimées à partir des déformations instantanées mesurées lors de la mise en charge sont comparées sur la Figure 4 – 24 à celles mesurées selon la recommandation (RILEM, 1972) avec la cage d'extensométrie à l'échéance quasiment identique de 28-29 jours. Les éprouvettes étaient en cure endogène jusqu'à l'échéance d'essai.

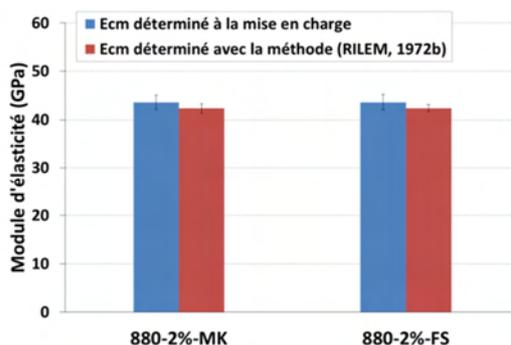


Figure 4 – 24 : Comparaison des modules d'élasticité des deux BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK déterminés à la mise en charge et par la méthode (RILEM, 1972)

Nous pouvons constater que les bétons étudiés ont des modules d'élasticité très proches autour de 43 GPa, quel que soit le mode opératoire. La légère différence observable peut difficilement être expliquée par les taux de chargement différents des 2 essais, $30\%f_{cm}$ dans le cas des essais (RILEM, 1972) et $23\%f_{cm}$ environ dans le cas des essais de fluage, puisque l'on demeure dans le domaine élastique linéaire des matériaux pour de tels taux. Ce faible écart peut davantage avoir pour origine les dispositifs d'essai et de mesures différents. Ces résultats permettent de s'assurer que la mise en charge des essais de fluage a été correctement réalisée.

4.2.3.2. Déformations différées sous charge

La Figure 4 – 25 présente respectivement les déformations totales sous charge des BFUP 880-2%-MK et 880-2%-FS. L'axe des abscisses est exprimé en $t - t_0$, t_0 correspondant à la date de mise en charge de fluage, soit 29 jours.

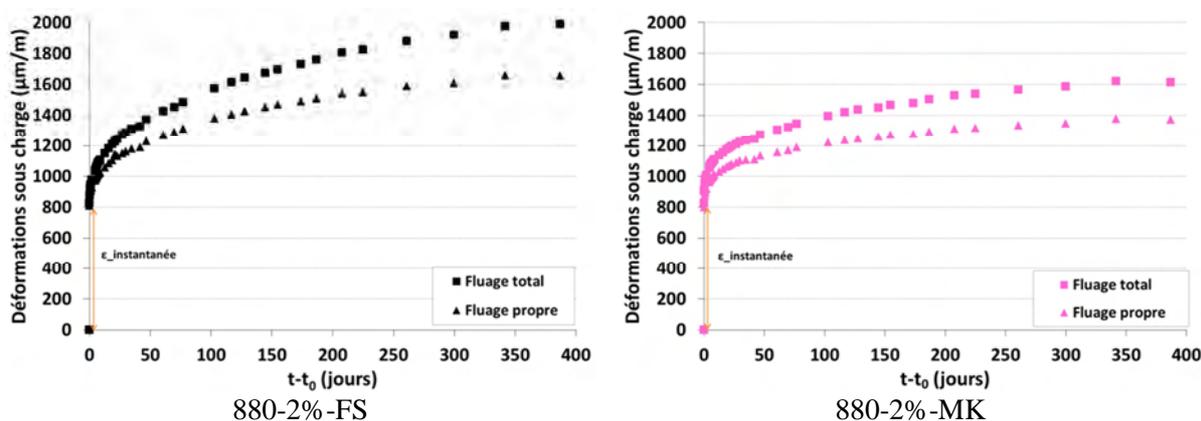


Figure 4 – 25 : Déformations sous charge des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK

De manière conventionnelle, quel que soit le mode de conservation des éprouvettes testées, la déformation sous charge correspond conventionnellement à la somme de la déformation instantanée lors de la mise en charge, et des déformations différée de retrait et de

fluage. La mise en charge engendre une déformation élastique instantanée suivie du développement des déformations différées sous charge. Des valeurs de déformation instantanées de l'ordre de $800 \mu\text{m/m}$ ont été obtenues pour les deux bétons. Pour obtenir les déformations différées, il suffit de soustraire la valeur de déformation instantanée des déformations totales sous charge.

La Figure 4 – 26 présente respectivement les déformations différées sous charge des BFUP. Les valeurs présentées sont les moyennes obtenues sur 3 éprouvettes testées. L'origine des temps correspond à la date de mise en charge de fluage, soit 29 jours.

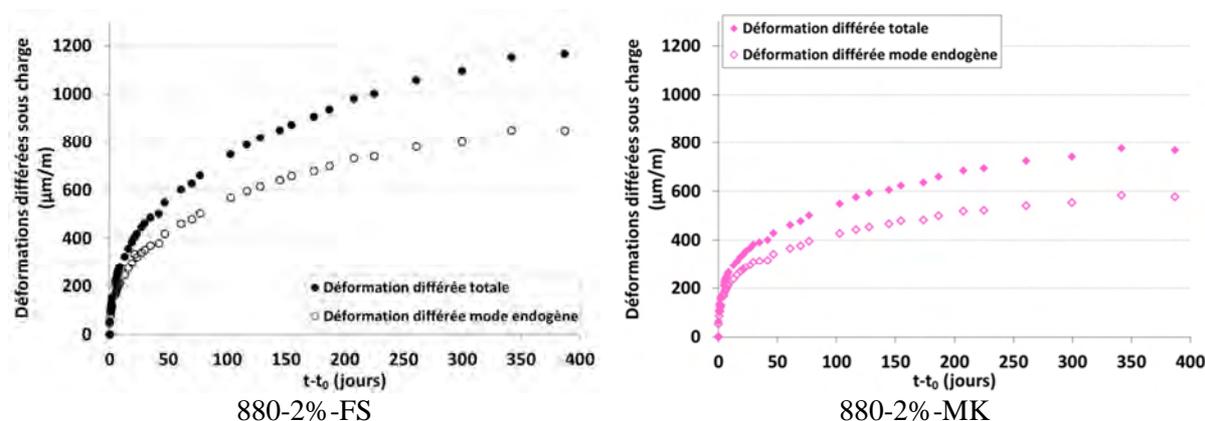


Figure 4 – 26 : Evolution des déformations différées sous charge des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK

Les courbes montrent une cinétique rapide des déformations différées peu de temps après la première mise en charge. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus par (Loukili et al., 1999) et (Habel, 2004) qui ont obtenu 35% de la déformation finale après 24 heures qui suivent le chargement pour le BPR.

L'analyse des résultats met également en évidence que les amplitudes des déformations différées du BFUP avec fumée de silice sont supérieures à celles du BFUP renfermant du métakaolin. Des valeurs de déformations différées totales de $1152 \mu\text{m/m}$ et de $777 \mu\text{m/m}$ ont été obtenues après 386 jours de chargement respectivement pour le 880-2%-FS et 880-2%-MK. Les écarts de comportement différé entre deux bétons peuvent généralement être expliqués par les différences de compacité, des caractéristiques de leur réseau poreux, du degré de saturation, mais aussi de la microstructure et en particulier des C-S-H dont les glissements de feuillet seraient à l'origine du fluage (Ulm et al., 1999). L'amélioration de la compacité de la matrice réduit par exemple les déformations différées sous charge. Il est également connu que le fluage dépend de l'humidité interne et qu'un béton sec ne flue pas.

Parmi les hypothèses en relation avec les paramètres influents précités, seules celles ayant été proposées au niveau du retrait doivent être conservées. D'après les résultats de retrait, le réseau poreux du BFUP avec fumée de silice serait plus fin, mais pas forcément moins développé comme nous le verrons dans le chapitre 5, ce qui engendre un retrait endogène important. En revanche, le séchage est plus limité, ce qui induit un retrait de dessiccation plus faible. Des différences au niveau de la microstructure de ces deux BFUP pourraient aussi entraîner des effets couplés à ces mécanismes. Il est possible que la teneur en C-S-H soit plus supérieure dans le béton incorporant de la fumée de silice, sachant que, comme indiqué précédemment, ce type d'hydrates est considéré comme étant le siège des déformations différées sous charge. La fumée de silice est réputée pour sa forte pouzzolanité et ses cinétiques de réactions élevées. L'étude de pouzzolanité de ces deux ultrafines sera étudiée ultérieurement dans le chapitre 5 à travers les suivis des teneurs en portlandite, qui est l'hydrate du ciment consommé pour former les C-S-H secondaires. A même classe de résistance, une quantité plus conséquente de C-S-H secondaires pourrait expliquer, avec les autres hypothèses avancées, et ce probablement de manière couplée, les déformations différées supérieures pour le BFUP à base de fumée de silice. Enfin, le séchage plus faible et l'humidité interne plus élevée du BFUP avec fumée silice, alors que le dosage en eau des deux formulations est proche, pourrait être dû à la présence de couches d'eau piégées ou liées chimiquement dans les interfeuillets de C-S-H. Or cette eau pourrait agir comme lubrifiant facilitant les glissements de ces feuillets et accentuant les déformations différées sous charge.

4.2.3.2.3. Déformations de fluage spécifique

Les déformations de fluage sont obtenues en soustrayant les déformations de retrait à celle différées mesurées pendant l'essai de fluage. Cette méthode d'analyse est basée sur le principe d'indépendance et de superposition des phénomènes de retrait et de fluage sous chargement. Bien qu'il est connu que ces phénomènes sont couplés, cette méthode permet d'étudier uniquement l'effet de l'application de la contrainte de compression. Pour cette raison, les résultats sont exprimés en fluage spécifique, c'est-à-dire que la déformation de fluage est divisée par la contrainte de compression appliquée (en $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$). La Figure 4 – 27 présente les évolutions de fluage spécifique des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK.

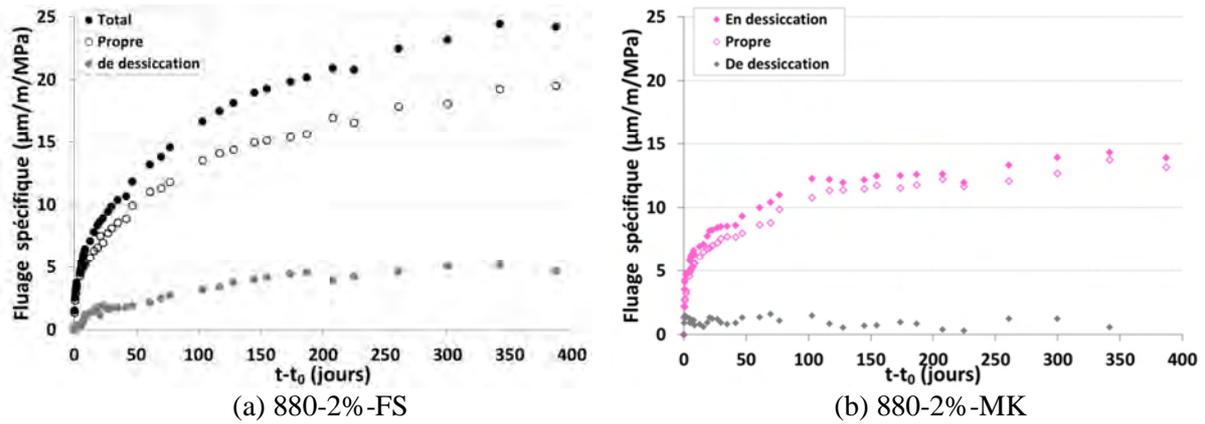


Figure 4 – 27 : Déformations de fluage spécifique propre, total et de dessiccation des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK

Sur la base de ces résultats, nous pouvons observer de manière globale que les valeurs de fluage spécifique des BFUP sont plus faibles que celles des bétons ordinaires, mais légèrement plus élevées que celles des BHP. Par rapport aux bétons ordinaires, ce constat peut être expliqué par le faible rapport E/C, qui limite les contraintes macroscopiques reprises par le squelette solide dû au départ d'eau libre. Pour les bétons ordinaires de rapport E/C plus élevé et donc de teneur en eau libre plus importante, le passage de l'eau entre les pores des hydrates vers les pores capillaires pourrait provoquer la rupture des liaisons entre les feuillettes de C-S-H, ce qui engendrerait à l'échelle macroscopique un surplus de déformations de fluage (Bazant et Chern, 1985). En revanche, par rapport aux BHP, les plus grandes amplitudes de fluage spécifique des BFUP peuvent être attribuées au grand volume de pâte. En effet, les déformations différées et celles de fluage en particulier sont régies par la pâte et ses caractéristiques (volume, porosité, microstructure, quantité de C-S-H, etc.), alors que les granulats, eux, ne se comportent que comme des inclusions rigides qui s'opposent aux contractions de celle-ci. Comme nous l'avons expliqué précédemment, le volume important de pâte associé à une forte quantité de C-S-H dans les BFUP pourraient conduire à une capacité de glissement entre les feuillettes plus significative, et donc à un fluage supérieur à celui des BHP.

Le Tableau 4 – 15 montre une comparaison des valeurs de fluages spécifiques des BFUP étudiés avec ceux de la bibliographie.

Tableau 4 – 15 : Comparaison des valeurs de fluages spécifiques des BFUP étudiés à 386 jours avec ceux de la littérature

Formules	Fluage total spécifique ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$)	Fluage propre spécifique ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$)
880-2%-FS	24	19
880-2%-MK	13	13
CEMTEC [®]	45	-
BFUP-A 50 °C (Francisco, 2012)	-	20

La valeur du fluage propre spécifique du BFUP contenant la fumée de silice est cohérente avec celle obtenue par (Francisco, 2012) pour un BFUP à base de fumée de silice. Son fluage spécifique total est lui inférieur à celui du BFUP CEMTEC[®]. Nous pouvons constater que les amplitudes de déformations de fluage spécifique du 880-2%-FS obtenues à 386 jours sont plus intenses que celles du 880-2%-MK. Cette différence peut être attribuée d'une part à l'amélioration de la compacité de la formule 880-2%-MK. Nous rappelons qu'une étude d'optimisation de la compacité du couple ciment/métakaolin a été réalisée durant l'étude de formulation par les essais de compacité humide. Cette optimisation semble bénéfique vis-à-vis du comportement différé avec une réduction du retrait et du fluage. D'autre part, comme nous l'avons expliqué précédemment, il est possible que la teneur supérieure en C-S-H secondaires dans le BFUP à base de fumée de silice augmente le fluage propre. Des hydrates plus rigides formés en présence de métakaolin pourraient également aller dans le sens de déformation de fluage atténuée. En outre, la faible capacité de séchage du BFUP avec fumée de silice, alors que le dosage en eau est semblable pour les deux matériaux, pourrait piéger de l'eau au niveau des interfeuillets de C-S-H facilitant ainsi, de par sa faible viscosité, leurs glissements.

La différence entre le fluage total spécifique et le fluage propre spécifique correspond au fluage de dessiccation. Une faible amplitude de l'ordre de $5 \mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ a été obtenue pour le 880-2%-FS, tandis qu'il est négligeable pour le 880-2%-MK.

4.2.3.2.4. Relation entre fluage spécifique et retrait

On considère généralement le fluage de dessiccation comme une part complémentaire du retrait de dessiccation grâce à l'effet de la contrainte mécanique sur la transmission des tensions capillaires. La Figure 4 – 28 montre ainsi la relation entre le retrait et le fluage de dessiccation.

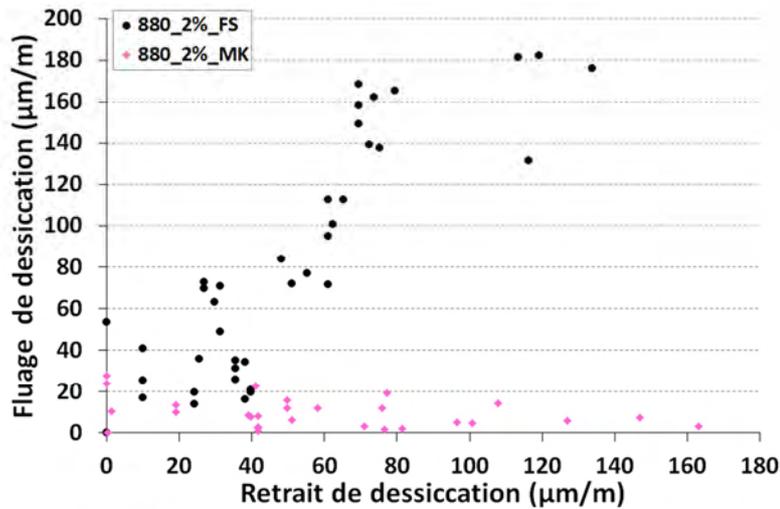


Figure 4 – 28 : Evolution du fluage de dessiccation en fonction du retrait de dessiccation des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK

Nous pouvons constater que la relation tracée pour le BFUP avec la fumée de silice peut être considérée comme linéaire, ce qui est un résultat connu (Gamble et Parrott, 1978). Tandis que pour le BFUP renfermant du métakaolin, le fluage de dessiccation est très faible, et constant au cours du temps. Ce résultat est particulièrement original et tend à démontrer les limites de la décomposition conventionnelle des déformations différées et de la non prise en compte des couplages des différents retraits et fluages. Il semble pour ce béton, qui pourtant sèche davantage que celui à base de fumée de silice, que l'application de la sollicitation en compression n'induit pas de complément de retrait et qu'il n'y ait pas de part structurale du fluage de dessiccation, ni de part intrinsèque.

4.2.3.2.5. Coefficients de fluage

Le coefficient de fluage ϕ est un paramètre qui caractérise la valeur de déformation de fluage due à l'application d'une contrainte de compression maintenue dans le temps. Ce paramètre est primordial pour le dimensionnement des structures en béton armé et béton précontraint, permettant d'estimer la perte de précontrainte due au fluage, le module d'élasticité différé et le coefficient d'équivalence, ainsi que les flèches maximales à long terme et les redistributions des efforts dans les structures hyperstatiques.

Le coefficient de fluage est défini comme le rapport entre la déformation de fluage considérée à l'infini et la déformation instantanée à l'instant de la mise en charge. Il est présenté dans le Tableau 4 – 16 pour chaque BFUP étudié. La valeur de déformation de fluage utilisée pour le calcul est celle déterminée à 386 jours.

Tableau 4 – 16 : Valeurs des coefficients de fluage des BFUP étudiés en mode propre et en mode dessiccation (total)

	ϕ en mode propre	ϕ en mode total
880_2%_FS	0,76	0,97
880_2%_MK	0,56	0,56

Sur la base des résultats obtenus, nous pouvons constater que les coefficients de fluage du BFUP à base de métakaolin sont plus faibles que ceux du BFUP renfermant la fumée de silice quel que soit le mode de conservation. Les coefficients de fluage obtenus pour le 880-2%-MK sont inférieurs à 0,8, valeur recommandée pour les BFUP non traités thermiquement selon (NF P18-470), alors que celui de fluage total de 880-2%-FS est légèrement supérieur.

CONCLUSIONS

L'étude du comportement mécanique des quatre formulations de BFUP a été traitée dans ce chapitre. L'objectif était d'évaluer leurs propriétés mécaniques instantanées et différées, de les situer par rapport à la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) et d'analyser l'influence des paramètres de formulations. Nous rappelons qu'aucun traitement thermique n'a été appliqué.

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- les meilleures résistances caractéristiques en compression ont été obtenues pour les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK avec 150 et 152 MPa respectivement à 28 jours. Les deux autres formules 680-2%-MK et 880-1,5%-MK ont des résistances inférieures, respectivement de 129 et de 131 MPa.
- les modules d'élasticité sont compris entre 42 GPa et 45 GPa, et le coefficient de poisson est d'environ 0,2, ce qui est conforme aux critères de la (PR NF P18-470).
- les résistances élastiques caractéristiques en traction $f_{ctk,el}$ sont comprises entre 5,9 et 8,0 MPa. La valeur maximale de 8,0 MPa a été obtenue pour les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK. Les valeurs caractéristiques de résistance post-fissuration f_{ctfk} sont comprises entre 4,0 et 7,0 MPa.

Conformément à la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470), les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK sont classées en BFUP-S utilisables pour les structures, alors que la formule 880-1,5%-MK appartient à la classe BFUP-Z vis-à-vis de son comportement en compression. Quant à la formule 680-2%-MK, elle ne peut pas être classée en tant que BFUP

au sens de la prénorme (PR NF P18-470), mais néanmoins la résistance caractéristique obtenue est très proche de celle exigée. Vis-à-vis du comportement en traction, les BFUP 880-2%-MK, 880-2%-FS et 880-1,5%-MK peuvent être classés T2 peu écrouissant. Quant à la formule 680-2%-MK, qui contient le moins de liant, sa résistance élastique de 5,9 MPa légèrement inférieure à la limite de 6,0 MPa ne permet pas de la classer en tant que BFUP.

Les déformations différées ont été également mesurées dans l'optique de s'assurer de la conformité des valeurs de retrait et de fluage obtenues par rapport à celles recommandées par (PR NF P18-470).

- Le retrait total obtenu à 185 jours est compris entre 424 et 611 $\mu\text{m/m}$ dont une part endogène qui varie de 299 à 525 $\mu\text{m/m}$. Ces valeurs sont conformes à celles recommandées par (AFGC, 2013) et (PR NF P18-470). De manière globale, la formule à base de fumée de silice développe des amplitudes de retrait total et endogène plus importantes que celles des BFUP avec métakaolin. En revanche, son retrait de dessiccation est plus faible que ceux des BFUP qui incorporent du métakaolin.
- Les mesures de déformation de fluage en compression ont été réalisées uniquement sur les deux formules les plus performantes 880-2%-FS et 880-2%-MK. Les résultats montrent que le fluage propre spécifique de 880-2%-MK de 12 $\mu\text{m/m/MPa}$ est inférieur à celui de 880-2%-FS, qui est de 18 $\mu\text{m/m/MPa}$. Cette différence peut être attribuée à l'amélioration de la compacité de la formule 880-2%-MK, et à la possible quantité supérieure de C-S-H secondaires formés dans le BFUP à base de fumée de silice, sachant que ces hydrates sont considérés comme le siège des déformations de fluage. La faible capacité de séchage constatée pour ce BFUP, alors que le dosage en eau est semblable pour les deux BFUP, pourrait être attribuée à une eau qui serait liée chimiquement au niveau des interfeuilletts de C-S-H et qui faciliterait ainsi, de par sa faible viscosité, leurs glissements et amplifierait le fluage. Une valeur très faible du fluage spécifique de dessiccation, 5 $\mu\text{m/m/MPa}$, a été obtenue pour la formule 880-2%-FS, tandis que celle de 880-2%-MK est quasiment nulle. Le coefficient de fluage de 880-2%-MK est inférieur à 0,8, critère des BFUP sans traitement thermique (AFGC, 2013) et (PR NF P18-470), alors que celui du 880-2%-FS le dépasse légèrement.

Les BFUP étant désormais caractérisés mécaniquement et classés suivant la prénorme matériaux (PR NF P18-470), nous allons désormais compléter leurs cartes d'identité vis-à-vis de la durabilité afin de toujours les situer règlementairement, mais également de mener une

étude de la microstructure pour tenter d'expliquer certains comportements mécaniques singuliers.

CHAPITRE 5 : MICROSTRUCTURE ET DURABILITE

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré aux études menées sur la microstructure de deux pâtes caractéristiques des BFUP à base de métakaolin et de fumée de silice, et sur la durabilité des BFUP. L'objectif est de caractériser cette microstructure, de compléter les cartes d'identité de nos matériaux vis-à-vis de la durabilité et des propriétés de transfert, mais également d'apporter des informations qui pourraient confirmer les hypothèses émises lors de l'étude mécanique et du comportement différé, ou permettre de mieux les appréhender.

Les investigations réalisées sur pâtes à base de ciment et de fumée de silice ou de métakaolin sont des analyses par Diffraction des Rayons X (DRX), des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB), et des analyses thermogravimétriques (ATG). Outre les objectifs cités auparavant, le but était de mieux comprendre le lien entre l'état de la microstructure et les performances mécaniques et de durabilité si élevées de ces matériaux. Nous présentons également les résultats de l'évaluation des indicateurs généraux de durabilité, à savoir la porosité accessible à l'eau, la perméabilité au gaz, la diffusion accélérée des ions chlorures, et la carbonatation. Les résultats obtenus pour ces indicateurs seront confrontés aux valeurs recommandées par la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470).

Nous détaillerons dans un premier temps les matériels et méthodes utilisés avant de présenter et d'analyser les résultats de l'ensemble de cette étude.

5.1. Matériels et méthodes

5.1.1. Microstructure

Cette partie décrit les essais permettant de caractériser deux pâtes caractéristiques des BFUP de notre étude qui ne diffèrent que par le type d'addition utilisée, fumée de silice ou métakaolin. Les essais sont les Analyses ThermoGravimétriques (ATG), les Analyses Thermiques Différentielles (ATD), la Diffraction de Rayons X (DRX) et les observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB). La campagne expérimentale est détaillée dans le Tableau 5 - 1 avec les échéances des mesures. Une cure humide a été appliquée puisqu'il s'agit du type de cure utilisée dans les normes des différents essais des indicateurs de durabilité.

Tableau 5 - 1: Programme expérimental de caractérisation de la microstructure

Essais	Échantillons	Cure	Échéances	Objectifs
Diffraction aux rayons X (DRX)	Pâtes	Humide 20±2°C et 95±5%HR	7, 28, et 90 jours	Identification des hydrates cristallisés formés
Analyses thermiques (ATG)				Evaluation de la quantité de portlandite et d'eau liée
Microscope électronique à balayage (MEB)				Identification des phases minéralogiques

Nous allons présenter par la suite les appareils et méthodes employés pour réaliser ces essais.

5.1.1.1. Analyses par Diffraction de Rayon X

Ces essais de DRX ont pour objectif d'étudier l'évolution des hydrates cristallisés formés dans les deux pâtes à 7, 28 et 90 jours. Les pâtes ont subi une cure humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ HR jusqu'à l'échéance d'essai. Pour effectuer ces essais, les pâtes ont été broyées au mortier d'agate jusqu'à l'obtention de grains de taille inférieure à $80\mu\text{m}$. Les poudres ont ensuite été testées sur un diffractomètre Siemens D5000 qui permet d'obtenir des résultats sous forme de diffractogrammes.

5.1.1.2. Analyses thermiques

L'analyse thermogravimétrique ATG est souvent complémentaire de la DRX. Elle permet de quantifier les teneurs en eau liée, en particulier pour évaluer la teneur en portlandite, et en carbonate de calcium. Le principe est de mesurer les variations de masse d'un échantillon de

poudre, ici un matériau cimentaire finement broyé, durant son échauffement entre 20°C et 1000°C. Avant l'essai, les échantillons de pâte ont été conservés dans une salle humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ HR. A la sortie de la salle humide, les échantillons ont été finement broyés au mortier d'agate pour obtenir des grains, de même taille que ceux analysés à la DRX. La durée de l'essai est d'une heure environ avec une vitesse de montée en température de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Durant l'essai, la perte de masse et le flux thermique sont enregistrés. Le traitement des résultats permet de tracer la perte de masse ATG, et sa dérivée DTG en fonction de l'élévation de température. Ces courbes permettent de décrire les différentes phases de décomposition du matériau cimentaire.

5.1.1.3. Observations au MEB

Le microscope électronique à balayage (MEB), couplé à un analyseur chimique à dispersion d'énergie (EDS), permet d'analyser de manière quantitative les phases hydratées. Les observations ont été effectuées en mode rétrodiffusé (BSE) sur échantillon poli qui donne accès à un contraste en niveau de gris en fonction de la composition chimique des matériaux. Les échantillons destinés à ce type d'essai, de dimensions approximatives de $2 \times 2 \times 0,5$ cm, ont été prélevés au cœur des pâtes par sciage, ils ont été ensuite polis et métallisés au carbone afin de les rendre conducteurs. Les observations au MEB ont été réalisées à 7, 28, et 90 jours avec un grossissement de 300, ceci afin d'avoir une vision représentative de l'ensemble des phases, anhydres et hydrates de la pâte, pour estimer le pourcentage de ciment anhydre via un logiciel de traitement d'images.

5.1.2. Propriétés de transfert

Dans cette partie, nous allons décrire les protocoles d'essais réalisés pour évaluer les indicateurs généraux de durabilité. Ces indicateurs sont la porosité accessible à l'eau, la perméabilité aux gaz, la carbonatation, et la diffusion des ions chlorures. La détermination de ces grandeurs a été effectuée à 90 jours conformément aux préconisations de (AFGC, 2013) et la prénorme (PR NF P18-470). Les éprouvettes destinées à cette étude ont subi une cure humide en étant placées dans une salle humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ HR jusqu'à 90 jours, conformément aux préconisations de ces deux documents, qui peuvent, pour certains tests, s'appuyer sur d'autres recommandations que nous citerons.

5.1.2.1. Mesure de la porosité accessible à l'eau

La porosité est un paramètre important qui régit significativement le comportement mécanique et la durabilité du béton. Cet indicateur est mesuré conformément à la recommandation (AFPC-AFREM, 1997). Trois échantillons de 3 cm d'épaisseur ont été prélevés dans des éprouvettes 11x22 cm. Il est bien évidemment préférable d'éviter les extrémités de l'éprouvette afin de s'affranchir des effets de bord (ségrégation, ressuage, etc.). Ils ont été ensuite mis sous vide pendant 4 heures, puis en saturation en eau sous vide pendant 24 heures. A la fin de cette étape, les échantillons ont été pesés dans l'air, puis dans un liquide de masse volumique connue, comme l'eau par exemple, et ensuite placés dans une étuve réglée à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse. La porosité accessible à l'eau, notée ε , et la masse volumique apparente, notée ρ_d , sont alors calculées selon les équations (5 - 1) et (5 - 2).

$$\varepsilon = \frac{(M_{air} - M_{sec})}{(M_{air} - M_{eau})} 100 \quad (5 - 1)$$

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{(M_{air} - M_{eau})/\rho_{eau}} \quad (5 - 2)$$

Où

- ε : porosité accessible à l'eau en %.
- ρ_d : masse volumique apparente de l'échantillon en kg/m³.
- M_{eau} : masse de l'échantillon immergé dans l'eau en kg.
- M_{air} : masse de l'échantillon imbibé pesé dans l'air en kg.
- M_{sec} : masse de l'échantillon sec pesé dans l'air en kg. L'échantillon a été séché en étuve à 105°C ± 2°C jusqu'à stabilisation de la masse qui correspond à une différence de moins de 0,5% entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle.
- ρ_{eau} : masse volumique de l'eau utilisée pour la pesée hydrostatique (kg/m³)

Les pesées sont réalisées en utilisant une balance avec une précision de 0,01g.

5.1.2.2. Mesure de la perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz est un indicateur permettant d'évaluer la capacité du matériau à empêcher la pénétration des agents chimiques agressifs. Le principe de l'essai consiste à

appliquer un gradient de pression constante à un échantillon de béton et à mesurer le flux de gaz, l'azote en l'occurrence, traversant l'échantillon en régime permanent. Il est alors possible de déterminer la perméabilité apparente à partir des mesures du flux de gaz sortant de l'éprouvette. Les essais de perméabilité au gaz ont été effectués sur des éprouvettes de 11,2 cm de diamètre et de 3 cm de hauteur conformément à la recommandation (AFPC AFREM, 1997). Les échantillons ont subi un cycle de séchage à 80°C, puis à 105°C pour atteindre l'état sec. Le séchage progressif a pour but de limiter la microfissuration de l'échantillon. L'état sec est atteint lorsqu'on constate la stabilisation des pertes de masse. Avant de commencer l'essai, il faut s'assurer que les échantillons soient en condition de température ambiante à 20°C. L'échantillon est ensuite placé dans un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU (Kollek, 1989) comme l'illustre la Figure 5 - 1.

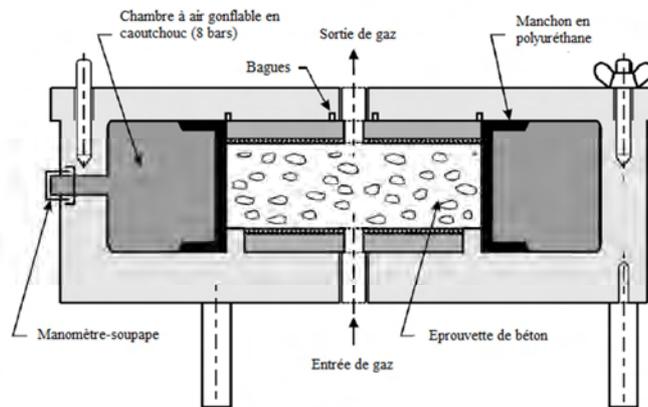


Figure 5 - 1 : Cellule pour les essais de perméabilité au gaz (Kollek, 1989)

La mesure de débit du flux de gaz sortant a été réalisée grâce à un débitmètre numérique à différentes pressions appliquées, 2, 3, 4, et 5 bars. La perméabilité apparente K_a est exprimée en m^2 et est calculée par l'intermédiaire de l'équation (5 - 6).

$$K_a = \frac{Q_1 2\mu L P_{atm}}{S(P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad (5 - 6)$$

Avec :

- Q_1 : débit volumique à l'entrée (m^3/s).
- μ : viscosité dynamique de l'azote (Pa.s).

- P_1 : pression d'injection (Pa).
- P_{atm} : pression atmosphérique (Pa).
- L : épaisseur de l'échantillon (m).
- S : section de l'échantillon (m²).

5.1.2.3. Coefficient de diffusion aux chlorures

Le coefficient de diffusion est un paramètre qui permet de décrire le transport d'une espèce à travers un matériau poreux lorsqu'une différence de concentration de cette espèce existe entre deux points du matériau. Le processus de diffusion naturel est lent et n'est pas satisfaisant dans le cas d'un besoin de résultats rapides pour évaluer le matériau. Des essais de migration ont été développés afin d'accélérer le transport des espèces ioniques, les ions chlorures par exemple. Le principe consiste à appliquer une différence de potentiel de part et d'autre de l'échantillon de béton via des électrodes. Sous l'influence du champ électrique, la pénétration des ions chlorures ainsi que les autres espèces ioniques est accélérée vers l'électrode de signe opposé. Il suffit de mesurer la profondeur de pénétration pour évaluer le coefficient de diffusion. Durant ce projet, nous avons réalisé cet essai sur 3 échantillons de 11,2 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur, conformément à (NTBuild 492, 1999). Le principe est présenté sur la Figure 5 - 2.

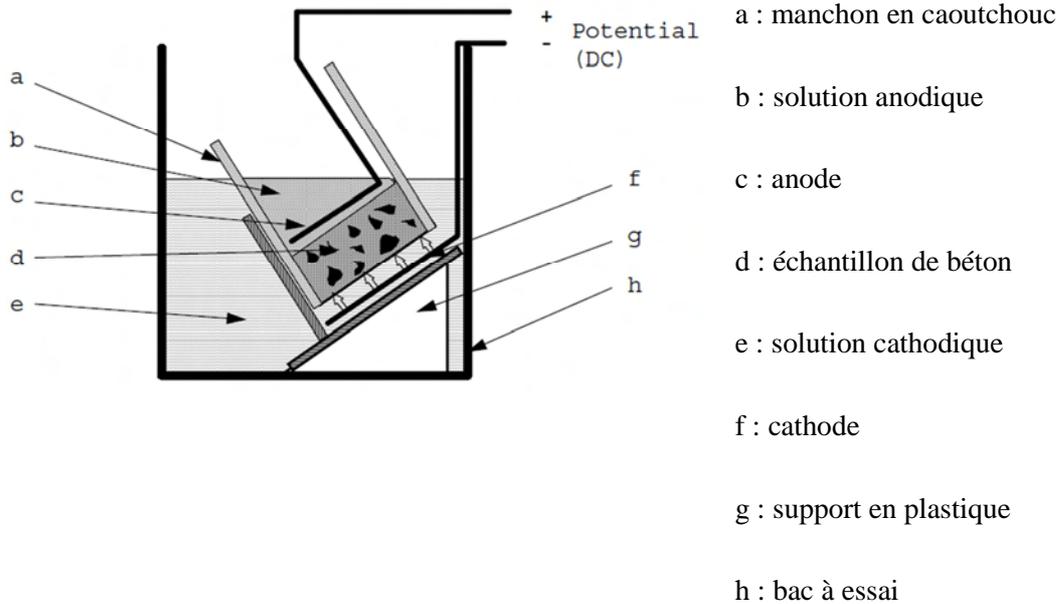


Figure 5 - 2 : Schéma de principe de l'essai de migration des ions chlorures selon (NTBuild 492, 1999)

Avant de lancer l'essai, l'échantillon est mis sous vide pendant 4 heures, puis en saturation en eau de chaux dosée à 12 g de chaux par litre d'eau pendant 24 heures. Par la suite, il est placé dans un manchon en caoutchouc muni d'un collier de serrage pour assurer l'étanchéité du compartiment contenant la solution anodique. Le tout est ensuite placé dans le support en plastique, qui lui-même est situé dans le bac d'essai contenant la solution cathodique. La solution cathodique a été préparée à base de chlorure de sodium NaCl à 10% par rapport à la masse d'eau, soit 100g de NaCl par litre d'eau environ. La solution anodique est à base d'hydroxyde de sodium NaOH à la concentration de 12 g par litre d'eau. Une fois le montage de l'essai réalisé, une différence de potentiel de 30 V est appliquée entre la cathode et l'anode pour déterminer le courant I traversant l'échantillon. En fonction de la valeur du courant relevé, la différence de potentiel peut être ajustée afin d'obtenir une durée d'essai de 24 heures. Ceci a pour but d'éviter la traversée totale du front de pénétration. A la fin de l'essai, les échantillons sont sciés en deux et pulvérisés par une solution de nitrate d'argent qui réagit avec les ions chlorures pour former du chlorure d'argent qui noircit à la lumière. Le front de pénétration correspond à la moyenne de plusieurs mesures de distance pénétrée, notée x_d dans l'équation (5 - 7).

Le coefficient de diffusion des ions chlorures est calculé selon l'équation (5 - 7).

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (5 - 7)$$

Où :

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)}$$

Et

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

Avec :

- D_{nssm} : coefficient de migration (m²/s)
- z : valence d'activité chimique des ions chlorures (z=1)
- F : constante de Faraday (F = 9,648x10⁴ J/(V.mol))
- U : tension appliquée (V)
- R : constante des gaz parfaits, R = 8,314 J/(K.mol)
- T : température moyenne de l'essai (°C)
- x_d : front de pénétration (m)
- t : durée de l'essai (heures)
- c_d : concentration de chlorure correspondant à la mesure de x_d (mol/L)
- c_0 : concentration en ion chlorures dans la solution NaCl (mol/L)

5.1.2.4. Carbonatation accélérée

La carbonatation est la réaction chimique entre le dioxyde de carbone présent dans l'air et la portlandite qui donne du carbonate de calcium CaCO₃, ou calcite. La diminution du pH du béton engendrée par cette pathologie entraîne la dépassivation puis la corrosion des armatures en acier dont les produits expansifs provoquent l'éclatement du béton d'enrobage et l'apparition de tâches de rouille sur le parement. La carbonatation naturelle est un processus lent, les premiers signes de dégradation apparaissant au bout de plusieurs dizaines d'années. Afin d'évaluer le risque de carbonatation des BFUP, des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm ont été soumises à des essais de carbonatation accélérés,

conformément à la recommandation (AFPC AFREM, 1997). A la sortie d'une cure humide de 90 jours, les éprouvettes ont subi dans un premier temps un séchage à température modérée à $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ dans une étuve pendant 2 jours. A la fin de la période de séchage, les éprouvettes ont été placées dans une enceinte de carbonatation qui contient 50% de CO_2 et 50% d'air pour suivre l'évolution de la carbonatation. Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté ont été relevées après pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine sur la surface sciée d'un échantillon prélevé à partir de l'éprouvette prismatique. Les échéances de mesures sont 7, 28, 90, et 365 jours. La solution phénolphthaléine révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée grâce à la coloration en violet de la zone saine.

5.2. Résultats et discussions

5.2.1. Microstructure

Nous avons vu dans le chapitre 4 que les propriétés mécaniques du BFUP à base de métakaolin sont comparables à celles du BFUP contenant de la fumée de silice de composition équivalente. En revanche, les déformations différées libres et sous charge sont plus faibles que celles du BFUP avec la fumée de silice. Nous allons essayer dans cette partie de vérifier si ces résultats peuvent s'expliquer par des différences au niveau de la microstructure, puisque son état et ses caractéristiques gouvernent les propriétés mécaniques des bétons. Nous avons donc étudié l'état de la microstructure par :

- Diffraction des rayons X pour suivre la réaction d'hydratation et déterminer la composition minéralogique des hydrates cristallisés formés ;
- Microscopie électronique à balayage pour évaluer la proportion de ciment anhydre au cours du temps ;
- Analyses thermiques pour avoir des informations sur les hydrates formés de manière qualitative et quantitative.

Les essais décrits ci-dessus ont été effectués sur les deux pâtes caractéristiques des deux formules de béton, 880-2%-FS et 880-2%-MK, sachant que les deux autres ne diffèrent que par leur volume de pâte et leur dosage en fibres métalliques. La confection des deux pâtes respecte donc les proportions massiques de ciment, d'addition ultrafine, d'eau, et de superplastifiant des BFUP 880-2%-FS et 880-2%-MK. Les échantillons de pâtes ont été

ensuite conservés dans une salle humide à température et humidité contrôlées ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, $95 \pm 2\%$ HR) jusqu'à l'échéance d'essai. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

5.2.1.1. Analyses par diffraction des rayons X et par thermogravimétrie

Nous regroupons les résultats des analyses par diffraction des rayons X et par thermogravimétrie dans la même section car ces analyses sont complémentaires.

➤ Analyse par diffraction des rayons X

Cette analyse permet d'obtenir les informations sur les phases cristallines de nos pâtes. Elle permet également d'obtenir des indications sur la présence de portlandite, ainsi que sa consommation dans le temps de manière qualitative. Les diffractogrammes des pâtes avec fumée de silice et métakaolin sont présentés sur les Figure 5 – 3 et Figure 5 – 4 à différentes échéances.

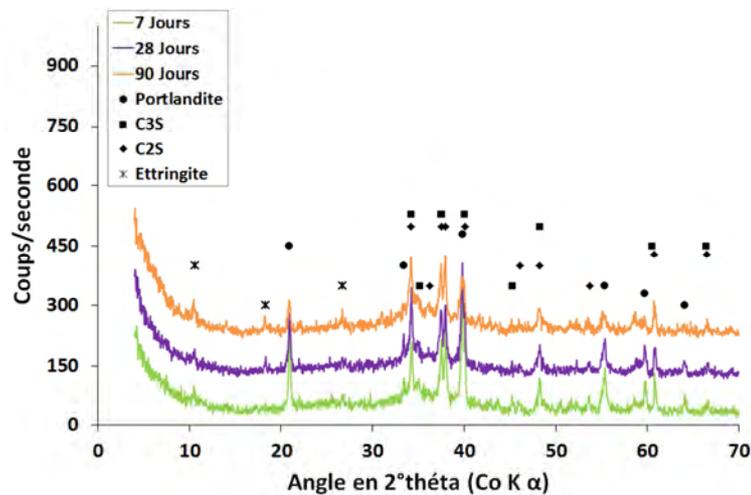


Figure 5 – 3 : Diffractogrammes de la pâte CEM I avec fumée de silice à 7, 28, et 90 jours

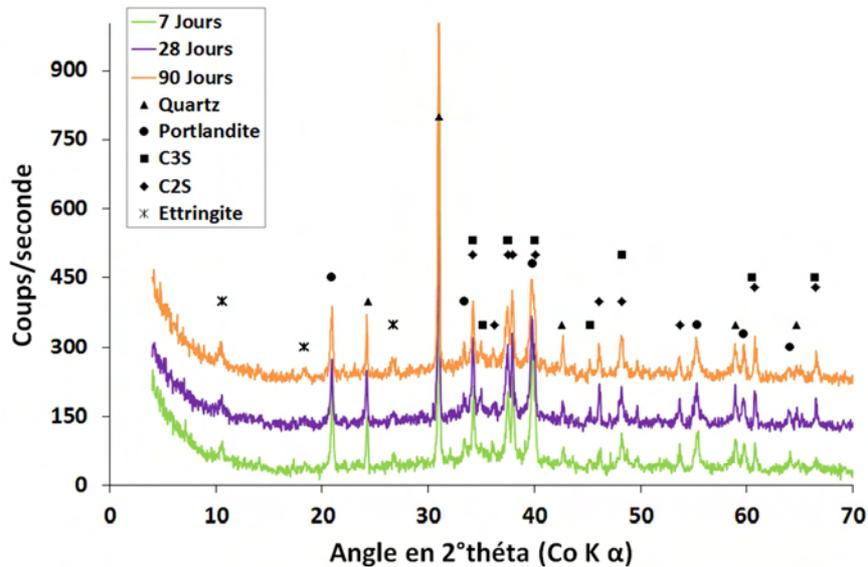


Figure 5 – 4 : Diffractogrammes de la pâte CEM I avec métakaolin à 7, 28, et 90 jours

Les diffractogrammes obtenus permettent d'identifier les différentes phases cristallisées. La hauteur des pics dépend de leur quantité mais aussi de l'orientation des cristaux, ce qui rend l'interprétation quantitative de la présence des phases délicate. Les phases amorphes telles que les silicates de calcium hydratés C-S-H produites au cours de l'hydratation sont représentés par une bosse sur les diffractogrammes centrée vers $35^\circ 2\theta$, qui devient plus intense au cours du temps, révélant l'augmentation de leur proportion.

Les pics d'anhydres du ciment C_3S et C_2S diminuent dans le temps dans les deux pâtes. Néanmoins, une présence importante de C_3S et C_2S est encore observable à travers ces diffractogrammes attestant d'une grande quantité de ciment anhydre même à 90 jours, comme attendu, compte tenu des faibles rapports E/C. Dans la pâte avec fumée de silice, nous pouvons remarquer les hydrates cristallisés tels que la portlandite, et l'ettringite. L'intensité des pics de portlandite diminue au cours du temps traduisant leur consommation par les réactions pouzzolaniques avec la fumée de silice. Pour l'ettringite, son intensité évolue peu au cours du temps. Dans la pâte renfermant du métakaolin, nous observons un pic de forte intensité de quartz provenant de cette addition. Les hydrates usuels tels que la portlandite et l'ettringite sont également présents. L'intensité des pics de portlandite diminue dans le temps. Toutefois, il est important de relever que la cinétique de diminution paraît moins marquée que dans le cas de la pâte avec la fumée de silice. Nous chercherons à confirmer avec les autres méthodes d'analyses si, comme semble l'indiquer cette observation par DRX, le métakaolin

consomme moins de portlandite que la fumée de silice dans nos pâtes. Comme pour la pâte avec la fumée de silice, les pics d'ettringite évoluent peu au cours du temps. Enfin, contrairement aux hypothèses de (Wild et al., 1998) sur la présence de la stratlingite qui pourrait provoquer un gonflement à l'origine du retrait endogène réduit constaté dans la matrice cimentaire à base de métakaolin, nous n'avons pas détecté cette phase cristalline avec l'analyse par diffraction aux rayons X.

➤ Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet d'apporter des informations complémentaires à la diffraction aux rayons X. Elle fournit des données sur les espèces amorphes, notamment les C-S-H, et permet de réaliser une analyse quantitative des teneurs en portlandite et en calcite.

L'essai est effectué sur les deux mêmes pâtes de ciment, l'une avec fumée de silice, l'autre avec métakaolin, aux mêmes échéances 7, 28 et 90 jours que pour l'analyse à la DRX. Avant l'échéance d'analyse, l'hydratation a été arrêtée par la lyophilisation, les échantillons ont été mis sous vide avant d'être broyés, puis ont été testés avec une vitesse de montée en température linéaire de 10°C/minute jusqu'à 1000°C.

Les courbes DTG obtenues sur les pâtes de ciment contenant la fumée de silice et le métakaolin à 7, 28 et 90 jours sont présentées sur la Figure 5 – 5.

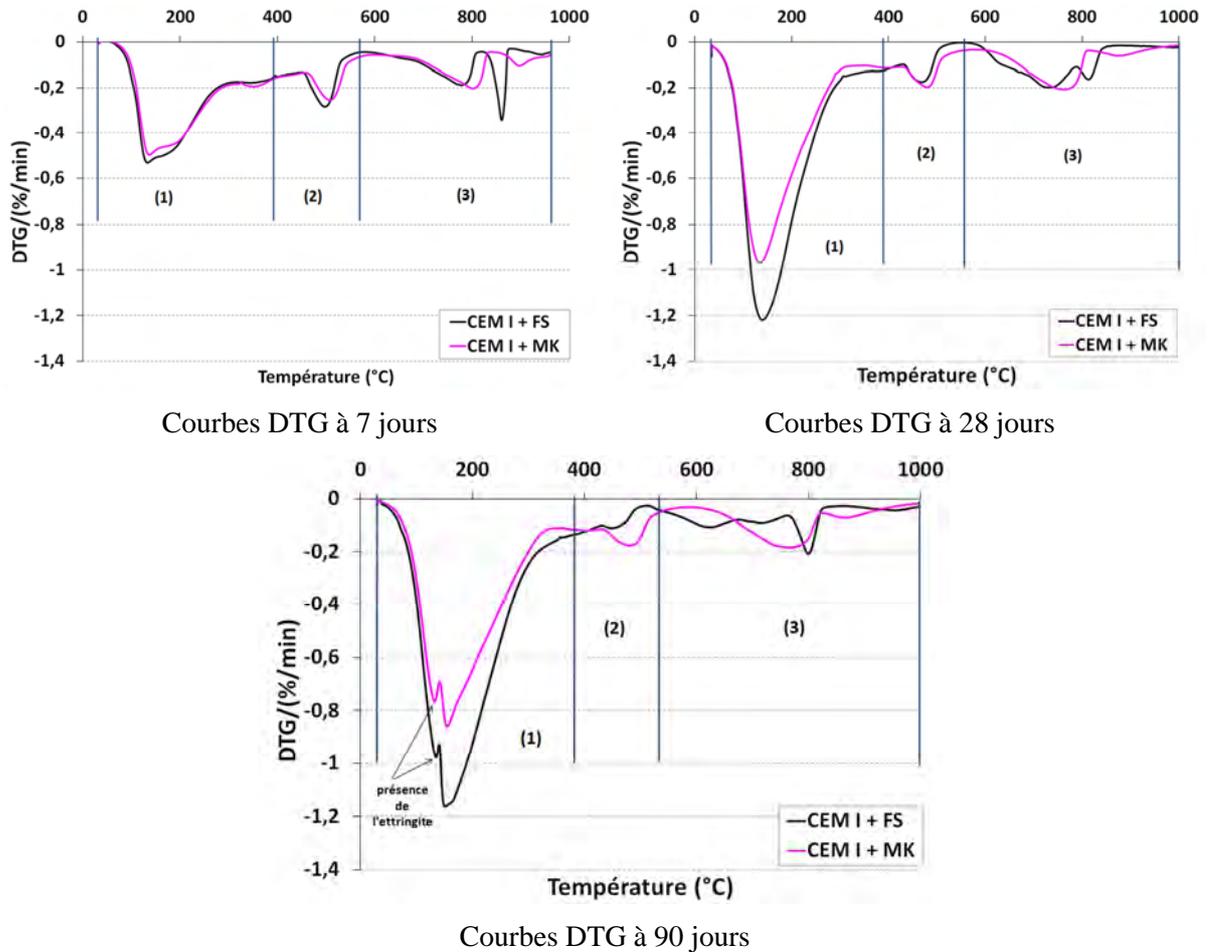


Figure 5 – 5 : Courbes DTG obtenues sur pâtes CEM I +FS et CEM I + MK à 7, 28, et 90 jours

L'observation des courbes permet de distinguer 3 phases :

- la première phase (1) de 80°C à 350°C correspond au départ de l'eau chimiquement liée aux hydrates tels que les C-S-H, les aluminates et l'ettringite. La décomposition de l'ettringite peut être observée dès 50°C.
- la seconde phase (2) de 450°C à 550°C environ correspond à la déshydroxylation de la portlandite. La teneur massique de portlandite peut être calculée à partir des résultats expérimentaux de DTG avec la relation suivante :

$$\%m_{Ca(OH)_2} = |\Delta m_{450^\circ C \rightarrow 550^\circ C}| \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}}$$

où $M_{Ca(OH)_2}$ représente la masse molaire de la portlandite et M_{H_2O} représente la masse molaire de l'eau.

- la troisième phase (3) de 550°C et 1000°C correspond à la décomposition de la calcite. La teneur massique en carbonate peut ainsi être calculée par la relation suivante :

$$\%m_{CaCO_3} = |\Delta m_{550^\circ C \rightarrow 1000^\circ C}| \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}}$$

où M_{CaCO_3} représente la masse molaire de la calcite et M_{CO_2} représente la masse molaire du dioxyde de carbone.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 – 2.

Tableau 5 – 2 : Détermination de la teneur en portlandite de deux pâtes à différentes échéances

Formulation	CEM I + FS			CEM I + FS		
Matériau étudié	Pâte			Pâte		
Âge (jours)	7	28	90	7	28	90
Teneur en portlandite (%)	3,65	2,17	trace	3,12	2,34	2,01

La quantification de la teneur en portlandite permet d'évaluer l'évolution des réactions pouzzolaniques entre les additions ultrafines et la portlandite formée lors de l'hydratation primaire du ciment pour former des C-S-H secondaires. A 7 jours, on constate une quantité plus importante de portlandite dans la pâte avec fumée de silice. La quantité de portlandite diminue ensuite dans les deux pâtes, ce qui traduit une augmentation des réactions pouzzolaniques. En revanche, les cinétiques d'évolution sont différentes suivant le type d'addition. En effet, contrairement à l'échéance de 7 jours, à partir de 28 jours, la portlandite devient moins présente dans la pâte avec fumée de silice, mais les valeurs demeurent proches. A 90 jours, il ne reste plus que des traces. Cela signifie que toute la portlandite a été consommée par la fumée de silice pour former les nouveaux hydrates de type C-S-H. Dans le cas de la pâte contenant du métakaolin, nous observons encore de la portlandite à 90 jours. Ceci peut être expliqué par une cinétique plus lente de la réaction pouzzolanique entre le métakaolin et la portlandite comparativement à la fumée de silice. L'analyse des évolutions de la portlandite est également confortée par les amplitudes significativement supérieures de la courbe DTG dans la phase (1) du BFUP avec fumée de silice qui est corrélée à la perte de masse des hydrates dont les C-S-H.

Ces résultats confirment les observations à la DRX sur la différence d'activité pouzzolanique dans le temps de ces deux additions. Ils peuvent expliquer les résistances mécaniques équivalentes des deux BFUP 880-2%-FS et BFUP 880-2%-MK sachant que la

réactivité pouzzolanique plus faible à plus long terme du métakaolin est probablement compensée par une meilleure compacité de sa formulation grâce à la prise en compte de son absorption et son dosage MK/C optimisé par essai de compacité humide.

La plus grande proportion de C-S-H secondaires notamment à partir de 28 jours et au-delà constituait également une hypothèse forte pour expliquer le fluage plus intense du BFUP avec fumée de silice. Ces observations par DRX et DTG apportent des éléments qui vont dans ce sens.

5.2.1.2. Observations au Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Pour analyser l'évolution de la microstructure dans le temps, nous avons réalisé des observations au MEB sur les échantillons de pâte après sciage et polissage toujours aux mêmes échéances de 7, 28, et 90 jours. Les observations ont été faites en mode « électrons rétrodiffusés » pour mieux mettre en évidence les différences de composition chimique. Pour chaque pâte et à chaque échéance, 25 photos ont été prises au grandissement x300 dans différentes zones de l'échantillon afin d'estimer la teneur en ciment anhydre.

La Figure 5 – 6 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 fumée de silice, ou aux grains de métakaolin 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.

De manière globale, les 2 pâtes présentent une grande quantité de grains anhydres résiduels, même après 90 jours, du fait de la très faible teneur en eau pour l'hydratation, ce qui confirme les données de la DRX.

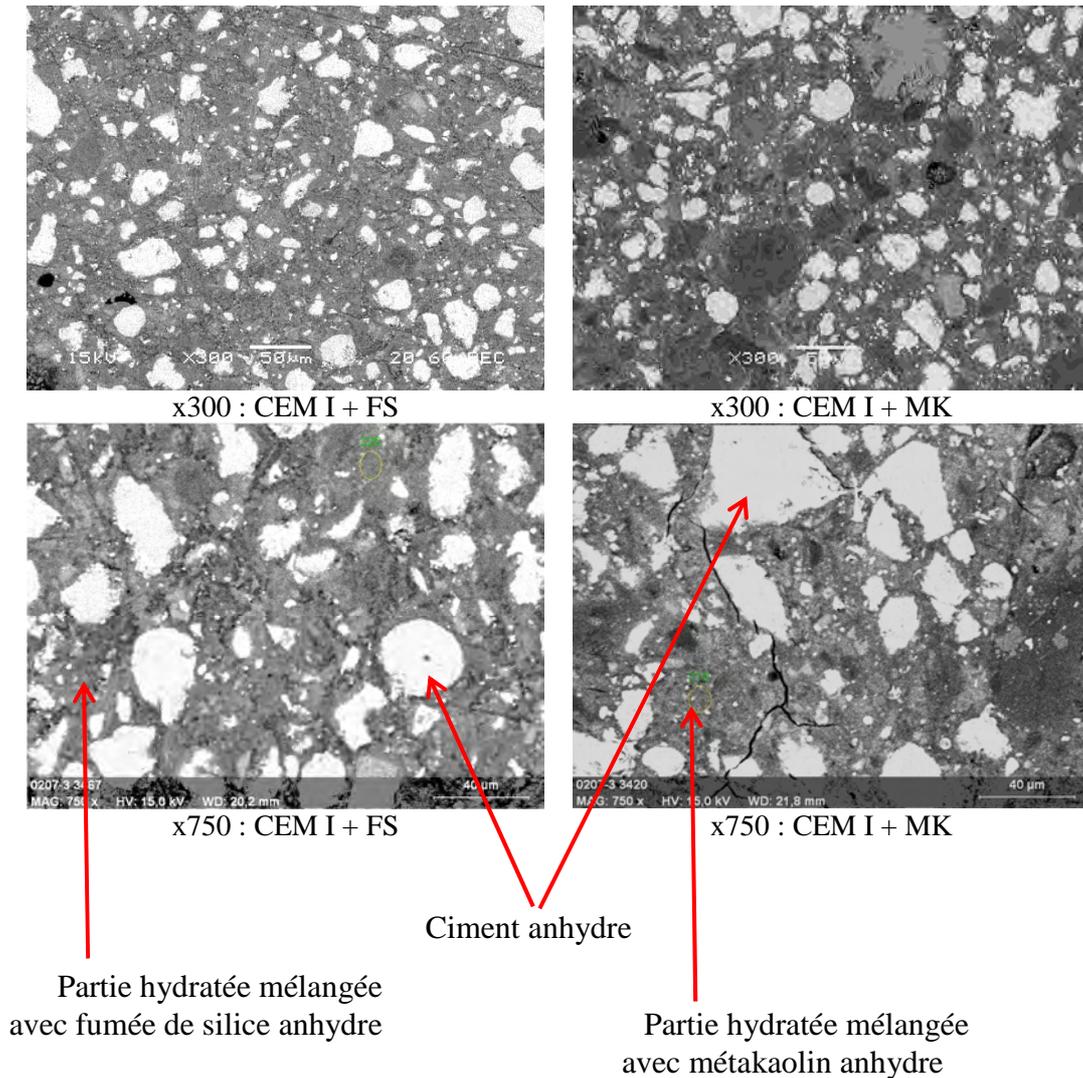


Figure 5 – 6 : Observations au MEB avec indications de l’agrandissement

La présence d’autant de grains de ciment anhydre est prévisible compte tenu des rapports E/C, et surtout n’est pas préjudiciable aux matériaux, bien au contraire. Comme nous l’avons précisé dans le chapitre bibliographique, les grains de ciment anhydre contribuent à augmenter la compacité de la microstructure par effet filler. Leur module d’élasticité élevé par rapport aux hydrates améliore la rigidité du BFUP. 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 (Richard et Cheyrezy, 1995).

A partir des photos prises durant l'observation, nous avons estimé de manière qualitative le taux de ciment anhydre de nos BFUP par analyse d'image (mode BSEI), grâce à un logiciel ImageJ qui permet de déterminer la surface des grains de ciment anhydre à partir des zones blanches sur les images. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 – 3.

Tableau 5 – 3 : Estimation de la surface des grains de ciment anhydre des deux pâtes à partir des images au MEB

Echéances (jours)	Taux de ciment anhydre (%)	
	CEM I + FS	CEM I + MK
7	18	19
28	15	16
90	13	14

Comme le laisser présager les faibles rapports E/C, les surfaces des grains de ciment anhydre sont importantes mais on remarque qu'elles tendent à diminuer de manière régulière dans le temps, même au-delà de 28 jours. On ne distingue pas de différences significatives entre les deux types de pâte.

5.2.2. Essais physico-chimiques de durabilité

Les BFUP sont en général utilisés pour remplacer les bétons ordinaires dans les applications spécifiques vis-à-vis de contraintes élevées en termes de performances mécaniques, mais aussi d'environnement chimique plus sévère, grâce à des propriétés exceptionnelles de durabilité. Nous avons démontré les caractéristiques mécaniques prometteuses des BFUP formulés durant ce projet. L'étude de la microstructure a permis de conforter certaines hypothèses émises lors de la caractérisation mécanique, notamment sur le retrait et le fluage. Nous allons donc désormais nous focaliser sur leurs durabilités, à travers un programme d'essais visant à évaluer quatre indicateurs de durabilité, à savoir la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'azote, la diffusion des ions chlorures et la carbonatation accélérée.

Les éprouvettes ont été conservées dans une salle humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ HR pendant 90 jours avant d'être soumises aux différents essais de durabilité. La détermination de ces paramètres fait partie des exigences demandées par (PR NF P18-4710) afin de pouvoir qualifier nos bétons en tant que BFUP vis-à-vis des propriétés de transferts.

5.2.2.1. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre déterminant qui régit la durabilité et les résistances du béton. L'essai de porosité accessible à l'eau a été réalisé à 90 jours sur les échantillons cylindriques de 3 cm de hauteur et 11,2 cm de diamètre.

Les résultats de porosité des quatre BFUP étudiés sont présentés dans le Tableau 5 – 4, la valeur présentée pour chaque BFUP correspond à la moyenne de 3 échantillons. L'écart type maximal entre les éprouvettes est de 0,4%. Dans le même tableau, nous avons reporté la plage de valeur recommandée par (AFGC, 2013) afin de situer les porosités de nos BFUP.

Tableau 5 – 4 : Valeurs de porosité obtenues pour les BFUP étudiés

Mesure	880-2%-FS	880-2%-MK	880-1,5%-MK	680-2%-MK	Critère (PR NF P18-470)
Porosité (%)	7,1 ± 0,2	6,4 ± 0,3	6,6 ± 0,2	9,1 ± 0,4	< 10

Les porosités à l'eau des BFUP étudiés varient entre 6,4% et 9,1% et satisfont donc les exigences de (PR NF P18-470). La confrontation des résultats permet d'étudier l'influence des paramètres de formulation sur la porosité à l'eau. Le BFUP avec la fumée de silice présente une porosité légèrement plus élevée que celle de son équivalent avec métakaolin 880-2%-MK, alors que leurs résistances mécaniques sont équivalentes. A 90 jours, l'effet de la portlandite totalement consommée dans le BFUP avec fumée de silice et de la plus forte proportion de C-S-H semble donc compensé par la porosité inférieure obtenue par le BFUP à base de métakaolin grâce à l'amélioration de la compacité de cette formulation (par la prise en compte de l'absorption d'eau par le métakaolin et de l'optimisation du rapport MK/C par l'essai de compacité humide). En outre, nous pouvons également rappeler que le rapport E_{efficace}/L du 880-2%-FS est légèrement supérieur, 0,19 contre 0,17. Pour expliquer le retrait endogène et le fluage plus intenses du BFUP avec fumée de silice, nous avons avancé les hypothèses selon lesquelles sa porosité pourrait être plus fine et qu'il contiendrait davantage de C-S-H. Bien que nous n'ayons pas étudié la distribution des pores, qui constitue une perspective de ce travail, la porosité légèrement plus élevée et la proportion plus importante de C-S-H, dont les glissements sous contrainte sont considérées comme étant une des origines principales du fluage, et ce à partir de 28 jours, début des essais de fluage, vont dans le sens des déformations différées sous charge supérieures de ce BFUP.

Les observations suivantes peuvent être faites lors de la comparaison entre les bétons à base de métakaolin :

- la réduction de la teneur en fibres de 2% à 1,5% a un effet négligeable sur la porosité si l'on compare les résultats de 880-2%-MK et 880-1,5%-MK de même rapport E/L. On peut néanmoins supposer que de plus forts dosages en fibres pourraient affecter la compacité de ces matériaux.
- la formule 680_2%_MK présente la porosité à l'eau la plus élevée, bien que respectant le critère de la prénorme (PR NF P18-470). Ce résultat peut être expliqué par un rapport E/L de 0,21 supérieur à ceux des autres bétons et par un manque de fines qui réduit sa compacité.

La Figure 5 – 7 présente une comparaison des porosités de nos BFUP avec celles de différents bétons, BO, BHO, BTHP, BFUP, obtenues lors d'études antérieures.

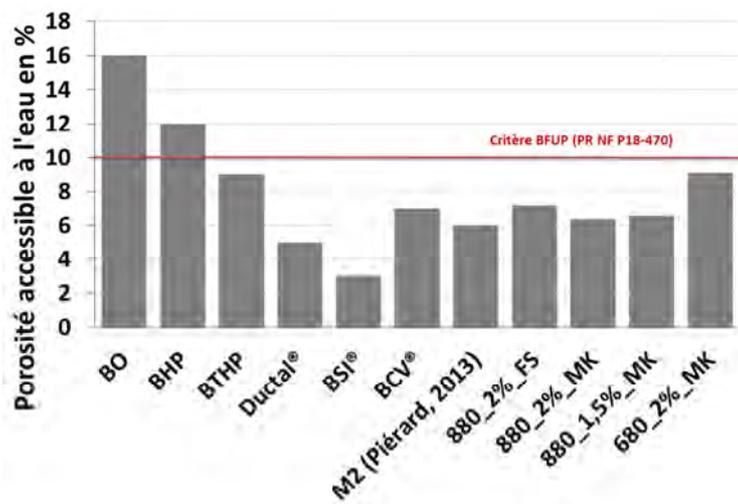


Figure 5 – 7 : Porosité accessible à l'eau de différents bétons

Ces résultats montrent que nos BFUP ont une porosité à l'eau évidemment inférieure à celles des BO, BHP, et BTHP. Cette porosité à l'eau réduite peut être attribuée à une matrice très dense, compacte, obtenue grâce au faible rapport E/C et au grand volume de liant avec fines pouzzolaniques qui combler les vides intergranulaires, dont la proportion est déjà restreinte de par l'utilisation de sable fin et l'absence de gros granulats.

Les valeurs de porosité à l'eau trouvées sont en revanche plus élevées que celles des BFUP commercialisés tels que Ductal® et BSI®. A titre de comparaison, (Resplendino, 2003)

indique des valeurs de la porosité accessible à l'eau comprises entre 1,5% et 5% pour les BFUP de type Ductal[®]. Des rapports E/C différents de ces BFUP ainsi que le traitement thermique à 90°C et à 100% HR que subissent les produits de la gamme Ductal[®] et qui permet d'obtenir de nouveaux types d'hydrates plus denses et plus résistants, peuvent être à l'origine de ces meilleures compacités. De nombreuses questions se posent aussi vis-à-vis de la méthode de mesure qui pourrait avoir des effets sur les valeurs de porosité à l'eau. En effet, (Ben Fraj, 2009) a noté une variation des valeurs de porosité à l'eau obtenues sur des bétons ordinaires de rapport E/C de 0,48 selon la durée de saturation. (Cherkaoui, 2010) a recommandé de rallonger la durée de saturation par rapport à celle indiquée par (AFREM, 1997) qui est de 24 heures. De plus, la grande quantité de ciment anhydre pourrait influencer les mesures de la porosité à l'eau en raison de la réhydratation du ciment durant la saturation (Cherkaoui, 2010).

5.2.2.2. Perméabilité à l'azote

La perméabilité d'un béton est fonction de son réseau poreux (taille et volume des pores, connectivité) qui lui-même dépend du type de liant et de son degré d'hydratation et des granulats utilisés.

Les essais de perméabilité des BFUP étudiés ont été réalisés selon la méthode CEMBUREAU (AFPC-AFREM, 1997). Pour chaque BFUP, les mesures de perméabilité ont été effectuées sur trois échantillons de 11,2 cm de diamètre et de 3 cm de hauteur préalablement séchés jusqu'à masse constante à 105°C, aux différentes pressions de 3, 4, et 5 bars.

La

Figure 5 – 8 présente les évolutions de la perméabilité moyenne à l'azote en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'entrée et de sortie, calculée à partir des résultats obtenus sur les 3 échantillons testés. L'extrapolation par régression linéaire de ces courbes permet d'obtenir la perméabilité intrinsèque K_v , qui correspond à la valeur de la perméabilité à l'origine de cette régression sur l'axe des ordonnées, pour chaque BFUP étudié. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 5 - 5.

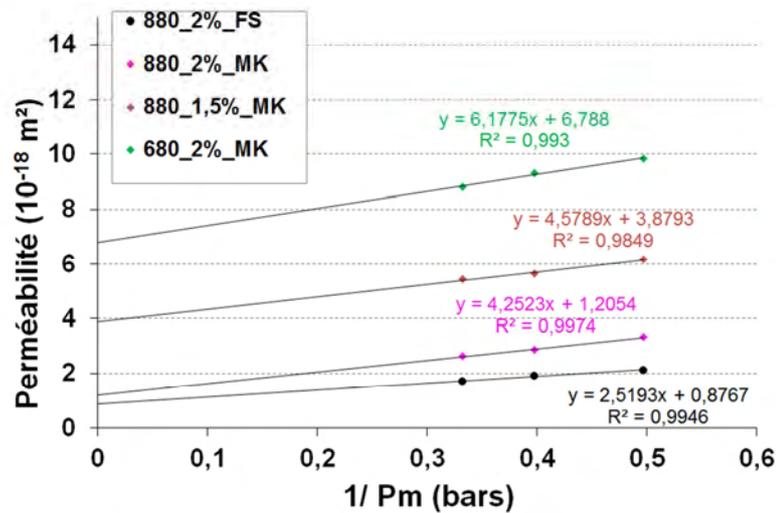


Figure 5 – 8 : Evolution de la perméabilité à l'azote en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'entrée et de sortie des quatre BFUP

Tableau 5 - 5: Comparaison des valeurs de la perméabilité intrinsèque K_v des BFUP étudiés avec le critère exigé par (PR NF P18-470)

Mesures	880_2%_FS	880_2%_MK	880_1,5%_MK	680_2%_MK	Critère (PR NF P18-470)
Perméabilité K_v (m^2) $\times 10^{-18}$	$0,87 \pm 0,12$	$1,20 \pm 0,39$	$3,87 \pm 0,47$	$6,78 \pm 0,66$	$\leq 0,20$

Les valeurs obtenues sont supérieures à celles reportées par (PR NF P18-470), (AFGC, 2013), et par (Resplendino, 2003). Ceci peut être expliqué par la température de séchage de 105°C, qui pourrait endommager la microstructure des échantillons testés, induisant une surestimation de la perméabilité obtenue. Cependant, les valeurs obtenues sont en accord avec celle obtenue par (Matte, 1999) pour un BPR sans traitement thermique, $2,5 \times 10^{-18} m^2$. Toutefois, il est précisé dans (AFGC, 2013), que les valeurs recommandées sont inférieures au seuil de détection de la méthode (AFPC AFREM, 1997). Or, cela est concordant avec les résultats « à la limite du bruit » obtenus lors d'une pré-étude de perméabilité menée sur échantillons à 80°C pour éviter les risques de microfissuration induit par le séchage à 105°C.

La confrontation entre les résultats obtenus sur les différents BFUP permet d'analyser l'influence des paramètres de formulation sur la perméabilité à l'azote. Tout d'abord, le béton à base de fumée de silice a une perméabilité plus faible que ceux incorporant du métakaolin malgré sa porosité accessible à l'eau légèrement plus importante que celle du BFUP équivalent à base de métakaolin 880-2%-MK. Ceci peut être induit par une diminution de la

connectivité du réseau poreux du BFUP avec la fumée de silice, ce qui pourrait dès lors expliquer ses cinétiques de séchage réduites. L'influence de la teneur en fibres sur la perméabilité n'a pas été notée. En revanche, la réduction de la teneur en liant conduit à la valeur de perméabilité la plus élevée, $6,78 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, pour le béton 680-2%-MK.

Les valeurs de perméabilité à l'azote de nos matériaux sont en accord avec les résultats obtenus par (Roux et al., 1995) et (Tafraoui, 2009). Cette faible perméabilité présente un intérêt certain pour la réalisation de structures étanches à l'eau et aux gaz (réservoirs, caissons, revêtements, entrepôts pour déchets radioactifs...).

5.2.2.3. Diffusion des ions chlorures

La pénétration des ions chlorures est un des phénomènes responsable de la corrosion des armatures et de la dégradation des structures en béton armé en général. Le BFUP étant aussi souvent associé avec la précontrainte, le phénomène de pénétration des ions chlorures peut constituer une des pathologies de dégradation des fils adhérents précontraints ou des câbles de précontrainte, mais aussi de leurs propres fibres métalliques.

Les essais accélérés de diffusion des ions chlorures, appelés également essais de migration sous champ électrique ont été réalisés selon le guide (NT BUILT-492) sur des échantillons cylindriques de 5 cm de hauteur et de 11,2 cm de diamètre. Ils permettent d'évaluer le coefficient de diffusion effectif des chlorures en régime stationnaire D_{eff} . Pour chaque béton, trois échantillons ont été testés à 90 jours après cure humide.

Les valeurs des coefficients de diffusion effectif D_{eff} des BFUP étudiés sont présentés dans le Tableau 5 – 6, où nous avons reporté la valeur préconisée par (PR NF P18-470) afin de situer nos BFUP.

Tableau 5 – 6 : Valeurs du coefficient de diffusion obtenues pour les BFUP étudiés

Coefficient de diffusion	880-2%-FS	880-2%-MK	880-1,5%-MK	680-2%-MK	Critère (PR NF P18-470)
D_{eff} (m ² /s)	$2,5 \times 10^{-14} \pm 1,4 \times 10^{-14}$	$2,7 \times 10^{-14} \pm 1,2 \times 10^{-14}$	$4,7 \times 10^{-14} \pm 1,1 \times 10^{-14}$	$4,7 \times 10^{-13} \pm 8,7 \times 10^{-14}$	$\leq 0,5 \times 10^{-12}$

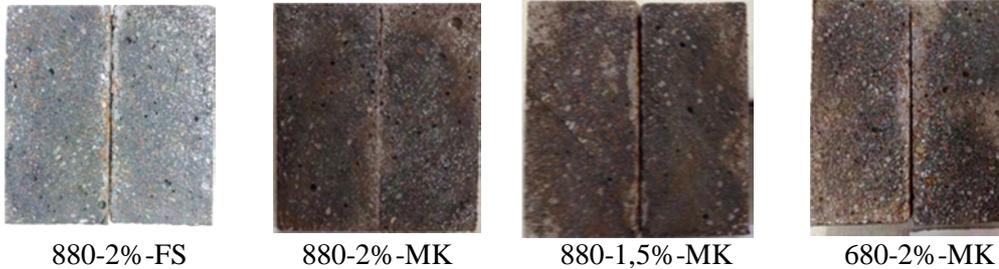


Figure 5 – 9 : Fronts de pénétration des ions chlorures des BFUP étudiés

Les résultats montrent que le coefficient de diffusion de nos BFUP est inférieur à la valeur indiquée par l’AFGC. Ils s’expliquent par la matrice dense obtenue grâce au faible rapport E/C, qui confère aux matériaux un réseau poreux peu connecté qui limite et restreint la pénétration des ions chlorures. Les fronts de pénétration présentés sur les photos de la Figure 5 – 9 confirment une très faible épaisseur de pénétration des ions chlorures avec une valeur moyenne calculée sur 10 points de mesures qui varie de 1 mm à 10 mm environ. La confrontation entre les valeurs des quatre matériaux met en évidence l’influence des paramètres de formulation. La comparaison entre 880-2%-FS et 880-2%-MK ne montre pas d’effet de la nature de l’addition pouzzolanique. En revanche, la confrontation entre les bétons à base de métakaolin montre l’effet de la teneur en fibre et en liant sur la diffusion des ions chlorures. La réduction de la teneur en fibres 880-1,5%-MK semble augmenter légèrement le coefficient de diffusion, peut-être du fait de la plus grande proportion de sable ajouté pour compenser le dosage abaissé en fibres, ce qui augmente les interfaces avec la pâte et les chemins de diffusion. Le béton 680-2%-MK se distingue par le plus fort coefficient de diffusion parmi les bétons testés, à cause de son rapport E/L supérieur et une compacité plus faible comme le démontre sa plus forte porosité accessible à l’eau.

Les valeurs sont significativement inférieures à celles des bétons ordinaires, jusqu’à 1000 fois plus faibles, et aux bétons à hautes performances. Il est important de noter que la connaissance de la diffusion des ions, en particulier les ions chlorures parmi les principaux responsables de la corrosion des aciers du béton armé, est déterminante pour la phase de

dimensionnement des ouvrages. En effet, si l'environnement où se situe l'ouvrage est fortement agressif (enceinte de refroidissement des aéroréfrigérants de centrales nucléaires, ambiance marine, zone de marnage...), il est nécessaire d'utiliser un béton de faibles perméabilité et diffusion afin d'assurer une longue durée de vie de l'ouvrage.

5.2.2.4. Carbonatation accélérée

Les essais de carbonatation accélérée ont été menés dans une enceinte contenant un mélange de 50% de CO₂ et 50% d'air et à 20°C et 65% HR (condition favorable pour le développement de la carbonatation). Les éprouvettes de dimensions 7x7x28 cm ont été placées dans l'enceinte après 90 jours de cure dans une salle humide à 20 ± 2°C et 95 ± 5% HR, puis 14 jours dans une salle à 20°C et 65% HR jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

Les mesures de profondeur de carbonatation ont été relevées selon la recommandation de (AFPC-AFREM, 1997) à 7, 28, 90 et 365 jours de conservation dans l'enceinte de carbonatation. Au bout d'un an, aucune présence de carbonatation n'a été observée malgré la longue durée de l'essai et les conditions accélérées comme nous pouvons le constater sur les photos de la Figure 5 – 10.

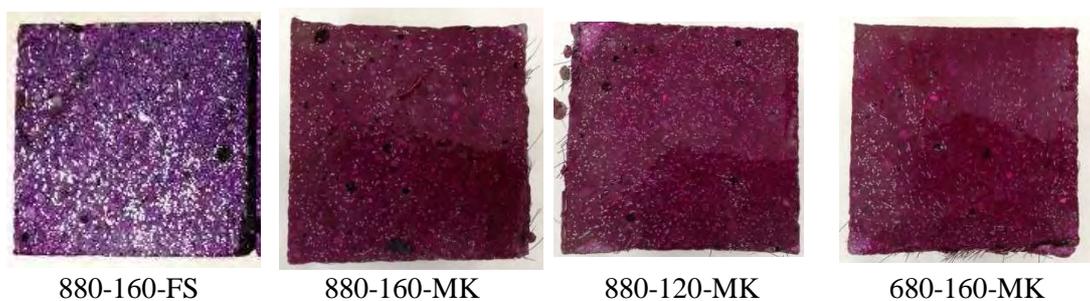


Figure 5 – 10 : Photographies des échantillons d'essai de carbonatation accélérée de quatre BFUP à 365 jours

Ces résultats sont en accord avec les résultats d'analyse thermique qui montrent qu'à 90 jours, la teneur en portlandite des pâtes contenant la fumée de silice est quasiment nulle et est très faible pour la pâte contenant du métakaolin, 2,01%. En outre, la très faible perméabilité de ces matériaux limite la progression du dioxyde de carbone qui ne peut donc pas atteindre la portlandite.

5.2.2.5. Classification vis-à-vis de durabilité potentielle de différents indicateurs de durabilité des BFUP

En se basant sur l'ensemble des résultats des indicateurs de durabilité obtenus, nous pouvons constater que les BFUP étudiés présentent de meilleures propriétés de durabilité par rapport aux bétons classiques. La porosité accessible à l'eau est faible, entre 6,4% et 9,1%, tout comme les coefficients de perméabilité à l'azote, qui varient de $0,87 \times 10^{-18} \text{m}^2$ à $6,78 \times 10^{-18} \text{m}^2$, et les coefficients de diffusion effectif des ions chlorures, qui varient de $2,5 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ à $4,7 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$, et aucune carbonatation n'a été détectée au bout d'un an. Ainsi, nous avons classé nos BFUP selon les critères de durabilité potentielle (AFGC, 2004) comme présenté dans le Tableau 5 – 7.

Tableau 5 – 7 : Evaluation vis-à-vis de durabilité potentielle de différents indicateurs de durabilité des BFUP testés

Indicateurs de durabilité	Résultats obtenus	Critères (PR NF P18-470)	Durabilité potentielle (AFGC, 2004)
Porosité à l'eau (%)	6,4 – 9,1	≤ 10	Très élevée
Carbonatation	Non mesurable	-	Très élevée
Perméabilité à l'air (m ²)	$0,87 \times 10^{-18}$ - $6,78 \times 10^{-18}$	$\leq 2 \times 10^{-19}$	Très élevée
Diffusion des ions chlorures (m ² /s)	$2,5 \times 10^{-14}$ – $4,7 \times 10^{-13}$	$\leq 0,5 \times 10^{-12}$	Très élevée

Les indicateurs évalués montrent une résistance très élevée aux agressions des agents chimiques, ce qui permet d'assurer une bonne protection des fibres métalliques, et de garantir la conservation des caractéristiques mécaniques en traction.

CONCLUSIONS

L'évolution de la microstructure au cours de l'hydratation de deux pâtes caractéristiques des BFUP à base de fumée de silice et de métakaolin a été analysée dans la première partie de ce chapitre. Les résultats obtenus à partir des analyses par diffraction de rayons X, par thermogravimétrie et des observations à la microscopie électronique à balayage ont permis de mettre en évidence que :

- Les hydrates observés par les analyses par diffraction de rayon X sont, pour ceux qui sont cristallisés, l'ettringite et la portlandite. Les C-S-H, phases amorphes, sont aussi détectés via la bosse caractéristique sur les diffractogrammes. Nous avons observé une diminution de l'intensité des pics de portlandite dans le temps. Ce résultat a été confirmé par les analyses thermogravimétriques, qui ont révélé de manière quantitative la consommation de la portlandite par la fumée de silice et le métakaolin au cours du temps. Nous avons aussi montré que la fumée de silice est plus réactive que le métakaolin à partir de 28 jours. La pâte à base de fumée de silice ne présente plus de portlandite à 90 jours alors qu'il en reste 2,01% dans celle avec métakaolin. Elle présente aussi une proportion plus élevée en C-S-H. En revanche, les pics caractéristiques du ciment anhydre diminuent peu au cours du temps, du fait du faible rapport E/L.
- Les images prises au MEB ont montré un pourcentage surfacique des grains de ciment anhydre de 13 à 14%, ainsi que les pics de C_3S et de C_2S qui évoluent peu sur les diffractogrammes de DRX. Cette quantité de ciment anhydre comble la microporosité par effet filler, et procure aux matériaux une meilleure rigidité et une capacité d'auto-cicatrisation sous conditions de fissuration avec un apport d'eau.
- La plus forte proportion en C-S-H, dont les glissements sont considérés comme étant une des sources du fluage du béton en compression, dans la pâte de ciment avec fumée de silice semble conforter l'hypothèse émise pour expliquer les déformations différées sous charge supérieures du BFUP avec cette addition par rapport à celui équivalent avec métakaolin.

La deuxième partie de ce chapitre concerne l'aspect durabilité des quatre BFUP étudiés. Nous avons évalué quatre indicateurs généraux de durabilité : la porosité accessible à l'eau, la

perméabilité à l'azote, la diffusion des ions chlorures et la carbonatation. Les résultats obtenus ont montré que les quatre bétons présentent des propriétés de transfert exceptionnelles et comparables aux valeurs trouvées dans la littérature pour cette classe de béton qui n'a pas subi de traitement thermique.

- De faibles valeurs de porosité accessible à l'eau respectant la valeur limite préconisée par (PR NF P18-470) ont été obtenues grâce à l'amélioration de l'homogénéité et de la compacité de la matrice cimentaire, en supprimant les gros agrégats, et en utilisant des additions fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et le métakaolin. Le rapport E_{efficace}/L réduit à des valeurs inférieures à 0,21 permet de limiter les vides, et ainsi d'augmenter les performances mécaniques. La valeur minimale de 6,4%, atteinte par le BFUP à base de métakaolin 880-2%-MK par rapport au 7,1% de celui avec fumée de silice, démontre l'efficacité et l'intérêt de l'étude d'optimisation du rapport MK/C par l'essai de compacité humide et de la prise en compte de l'absorption d'eau, bien que cette addition soit moins réactive et forme moins de C-S-H que la fumée de silice.
- Les indicateurs évalués montrent une résistance très élevée aux agressions des agents chimiques, ce qui permet d'assurer une bonne protection des armatures acier, mais aussi des fibres métalliques et de garantir la conservation des caractéristiques mécaniques en traction. Bien que les valeurs du coefficient de perméabilité intrinsèque obtenues soient supérieures à celle préconisée par (PR NF P18-470), elles sont néanmoins en accord avec celles de la littérature pour les BFUP sans traitement thermique. Elles sont également à la limite de la précision du dispositif d'essai et de mesure. En ce qui concerne les résultats du coefficient de diffusion, ils sont significativement en deçà de la valeur limite de (PR NF P18-470). Enfin, aucune carbonatation n'a été détectée sur les quatre bétons étudiés après 1 an d'exposition dans l'enceinte de carbonatation contenant 50% de CO₂ et 50% d'air.

Les BFUP étudiés ont donc une durabilité potentielle très élevée d'après (AFGC, 2004). Une utilisation dans les structures sous conditions d'environnement chimique sévère (enceintes de confinement du réacteur nucléaire, etc.) peut donc être envisagée, soit pour une application structurelle pour les deux formulations classés BFUP-S, soit pour un dispositif de protection à très faible perméabilité pour les deux BFUP classés BFUP-Z.

CHAPITRE 6 : JUSTIFICATION DES PREDALLES

INTRODUCTION

Les précédents chapitres ont détaillé les différentes étapes qui ont permis de mettre au point quatre formulations de BFUP et de dresser leur carte d'identité : caractérisation à l'état frais, mécanique et de leur durabilité. L'entreprise Lagarrigue dispose ainsi de matériaux qu'elle peut utiliser pour répondre aux appels d'offre et parmi lesquelles elle pourra sélectionner la formulation la plus adaptée en fonction du type d'applications.

L'entreprise Lagarrigue a été sollicitée pour la réalisation de prédalles en BFUP dans le cadre d'une réhabilitation d'un pont construit en 1898 qui franchit un ruisseau. Il s'agit de remplacer le tablier et le chevêtre en béton armé tout en conservant les culées existantes comme appuis. Le nouveau tablier à réaliser doit avoir un poids plus léger que le tablier actuel. La variante BFUP pour la réalisation des prédalles semble pertinente dans ce contexte, puisqu'elle conduit à un allègement du poids du tablier, à une simplification et à une rapidité de sa réalisation grâce à la suppression du système d'étaisements pour son coulage. Ces prédalles servent de coffrage perdu pour le coulage d'une dalle en béton armé supérieure. L'intérêt était également de pouvoir réaliser des prédalles en BFUP non armées, sans armatures passives, et fines avec une épaisseur envisagée de 4 cm. Le matériau choisi est la formulation 880-2%-MK qui est un BFUP-S utilisable pour des applications structurales.

Ce chapitre décrit donc le dimensionnement de ces prédalles en prenant en compte les descriptions du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP). La méthode de dimensionnement des prédalles en BFUP, basée sur les recommandations de (AFGC, 2013), et la prénorme (PR NF P18-710) spécifiée pour les calculs de structure en BFUP que nous avons présentées dans le chapitre 1, est appliquée.

6.1. Description du projet

Il s'agit de pré-fabriquer des prédalles en Béton Fibré à Ultra Performants (BFUP) qui servent de coffrage perdu pour le coulage d'une dalle supérieure en béton armé. Le plan d'une prédalle est présentée sur la Figure 6 - 1.

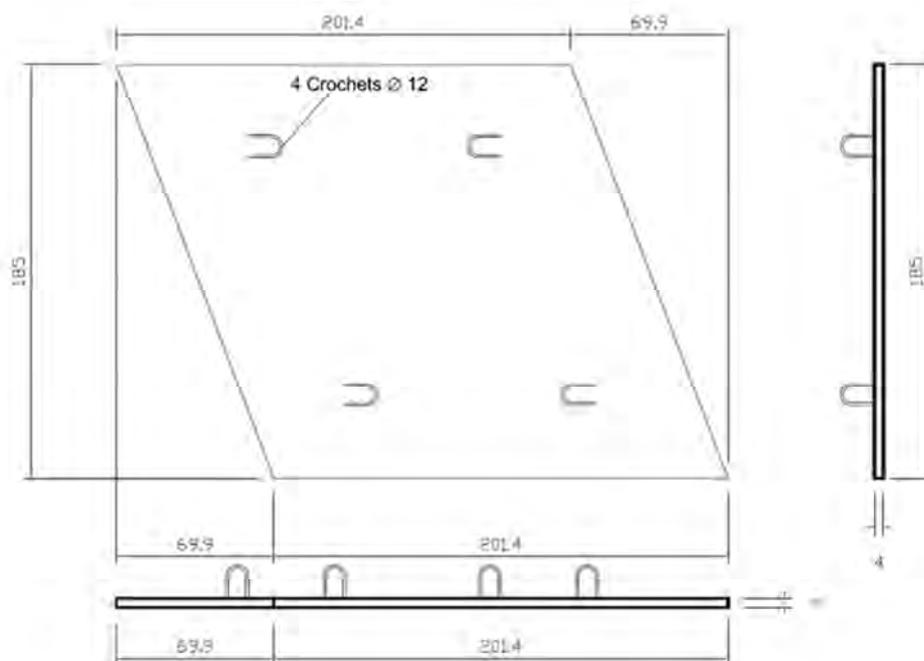


Figure 6 - 1: Plan de prédalle à réaliser avec cotations en cm

Les prédalles ont des dimensions de 2,014 m de longueur, de 1,978 m de largeur. L'épaisseur envisagée est de 4 cm pour le pré-dimensionnement. Elles reposent de manière isostatique sur les entretoises en acier de type tube. L'ouvrage est légèrement biais par rapport à l'axe de la rivière, d'où le biais des entretoises. Les prédalles reposant de manière isostatique sur les entretoises, ceci explique leur géométrie en parallélogramme.

6.2. Coefficients de sécurité pris pour le calcul

Les coefficients de sécurité suivants sont pris en compte :

- L'effet de la distribution et de l'orientation des fibres dans une structure réelle est considéré à travers le coefficient K. Les valeurs de K sont différentes suivant le type de structure épaisse ou mince. Dans les 2 cas, il est indispensable de déterminer ce paramètre, qui va régir la réponse mécanique de la structure. Ainsi, sa prise en compte dans les justifications à l'ELS et à l'ELU des structures s'effectue directement au niveau de la loi de comportement post-fissuration en traction du BFUP utilisé. Pour le

dimensionnement, et dans le cas des éléments épais, le coefficient K peut être pris égal à 1,25. Dans le cas des plaques minces, K est égale à 1.

- Le coefficient partiel de sécurité γ_{cf} relatif au béton fibré en traction pour les vérifications aux ELU doit être également pris en compte. Sa valeur dépend de la situation de l'ouvrage comme indiqué dans le Tableau 6 - 1. Dans notre cas, ce coefficient est égal à 1,3 car il s'agit d'un ouvrage provisoire de type coffrage perdu qui ne travaille mécaniquement qu'en phase construction.

Tableau 6 - 1: Coefficient γ_{cf} relatif au béton fibré en traction

$\gamma_{cf} = 1,3$	Situations de projet durable/transitoire
$\gamma_{cf} = 1,05$	Situations de projet accidentelles

- Les valeurs du coefficient partiel de sécurité relatif au béton pour la limite en compression γ_c à prendre en compte selon différents cas sont détaillées dans le Tableau 6 - 2. Dans notre cas, il est égal à 1,5 pour les combinaisons à l'ELU.

Tableau 6 - 2: Coefficient γ_c relatif au béton pour la limite en compression

	ELS	ELU
Situations de projet durable/transitoire	1	1,5
Situations de projet accidentelles		1,2
Situations sismiques		1,3

6.3. Propriétés des matériaux

La formulation 880-2%-MK a été sélectionnée pour réaliser ces prédalles pour plusieurs raisons. Il s'agit d'un BFUP-S utilisable pour des applications structurales, il se caractérise par les performances les plus élevées obtenues parmi les formulations à base de métakaolin et son coût de production est plus faible que celui à base de fumée de silice. Les valeurs des caractéristiques mécaniques nécessaires pour le dimensionnement sont détaillées dans le Tableau 6 - 3 avec la distinction ELS et ELU.

Tableau 6 - 3 : Caractéristiques en compression et en traction du matériau

	Caractéristique	Valeurs ELS	Valeurs ELU
Compression	f_{ck} (MPa)	152	-
	E_{cm} (GPa)	45	45
	ε_{c0} (%)	0,337	-
	f_{cd} (MPa)	-	86
	ε_{c0d} (%)	-	0,19
	ε_{cud} (%)	-	0,346
Traction	$f_{ctk,el}$ (MPa)	8,0	6,1
	$\varepsilon_{elastique}$ (%)	0,0177	-
	ε_{pic} (%)	1,14	-
	$\varepsilon_{1\%}$ (%)	2,64	-
	f_{ctfk} (MPa)	6,6	-
	$f_{ctfk}/K\gamma_{cf}$ (MPa)	-	4,0
	$f_{ctf 1\%}/K\gamma_{cf}$ (MPa)	-	3,4
	$\varepsilon_{u,pic}$ (%)	-	1,13
	$\varepsilon_{u,pic}$ (%)	-	2,63
	$\varepsilon_{lim} = \varepsilon_{u,lim}$ (%)		12,1

La résistance caractéristique en compression (f_{ck}), le module d'élasticité (E_{cm}), ainsi que la résistance caractéristique élastique en traction ($f_{ctk,el}$) et la résistance caractéristique post-fissuration (f_{ctfk}) ont été déterminées lors de l'étude mécanique détaillée du chapitre 4. Les autres paramètres présentés dans le Tableau 6 - 3 sont déduits à partir des caractéristiques déterminées.

6.4. Actions en service et combinaisons fondamentales en phase de construction

Les calculs sont menés vis-à-vis des charges de coulage du hourdis uniquement (poids propre du béton frais et des charges d'exploitation). Les sollicitations lors du levage des éléments sont moins dimensionnantes que celles de la phase de coulage (poids propre de la prédalle uniquement 1 kN/m²). En ce qui concerne la vérification lors du levage des prédalles au décoffrage, celle-ci a été validée expérimentalement sur site de production. Les combinaisons d'action en phase de construction sont présentées dans le Tableau 6 - 4.

Tableau 6 - 4: Combinaisons fondamentales et valeurs de charge et de moment sollicitant correspondant en phase construction

Combinaisons	Expression	Charges (kN/m ²)	Moment sollicité (kN.m)
ELS	$G_{k,sup} + Q_c$	4,40	2,09
ELU	$1,35G_{k,sup} + 1,35Q_c$	5,94	2,82

6.5. Dimensionnement des prédalles

Pour le dimensionnement, on assimile la prédalle à une poutre de 1 m de largeur et de 0,04 m de hauteur. Les prédalles sont donc considérées comme des éléments de type épais puisque leurs épaisseurs sont supérieures à 3 fois la longueur des fibres utilisées : $e \geq 3 \cdot l_f = 39 \text{ mm}$; avec $l_f = 13 \text{ mm}$.

Il s'agit d'effectuer des vérifications de la section à l'ELU et à l'ELS. A l'ELU, il convient de vérifier si la section résiste au moment de flexion et à l'effort tranchant maximaux. La non-fragilité doit être également vérifiée. A l'ELS, il faut réaliser les vérifications des limites de contrainte en traction, de l'ouverture de fissure maximale, et de la flèche admissible.

6.5.1. Justification de la section à ELU

6.5.1.1. Vérification vis-à-vis du moment de flexion à l'ELU

La vérification de la résistance de la section se fait en recherchant le moment résistant ultime de la section considérée sous combinaison de chargement à ELU. Pour cela, la méthode des pivots ou la méthode itérative (AFREM, 1995) présentées dans le chapitre 1 peuvent être utilisées (AFGC, 2013). Le moment résistant M_{Rd} a été déterminé avec la méthode itérative et la valeur de 3,16 kN.m a été obtenue. Le moment sollicitant M_{Ed} étant de 2,82 kN.m, nous pouvons donc conclure que la justification de la section vis-à-vis du moment de flexion à l'ELU est validée.

6.5.1.2. Non fragilité à l'ELU

La justification de non fragilité à l'ELU est obligatoire. Pour cela, il suffit de montrer que le moment élastique avant la fissuration est inférieur au moment résistant ultime de la section.

- Calcul du moment résistant élastique juste avant la fissuration (M_{rel})

Le moment élastique est calculé de manière classique, conformément à la résistance des matériaux, en section non fissurée :

$$\frac{M_{rel}}{I} \cdot y = f_{ctk,el}$$

$$M_{rel} = 1,6 \text{ kNm}$$

- Calcul du moment résistant ultime de la section fissurée M_{Rd} avec la méthode itérative (AFREM, 1995)

Nous avons obtenu $M_{rul} = 3,16 \text{ kN.m}$

$$\rightarrow M_{rel} < M_{rul}$$

La condition de non fragilité à l'ELU est vérifiée.

6.5.1.3. Vérification vis-à-vis de l'effort tranchant à l'ELU

Le principe est de vérifier si l'effort tranchant sollicitant (V_{Ed}) est inférieur à la résistance à l'effort tranchant ($V_{Rd,total}$) de la section.

La résistance à l'effort tranchant ($V_{Rd,total}$) est égale à la plus petite des deux valeurs (V_{Rd} et $V_{Rd,max}$) ; où $V_{Rd,max}$ désigne la résistance des bielles de compression du béton ; V_{Rd} désigne la résistance des tirants en traction du béton :

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f}$$

Avec $V_{Rd,c}$ terme de participation de béton ;

$V_{Rd,f}$ terme de participation des fibres.

Pour une section non armée, non précontrainte :

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf}\gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$

Avec f_{ck} est la résistance caractéristique en compression, exprimée en MPa ; b_w est la plus petite largeur de la section droite tendue (m) ; le produit $\gamma_{cf}\gamma_E$ est égal à 1,5.

Et $k = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}}$ si $\sigma_{cp} \geq 0$

avec $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ où N_{Ed} est l'effort normal agissant sur la section droite et A_c est l'aire

de la section droite de béton

Ou
$$k = 1 + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctk,el}} \text{ si } \sigma_{cp} < 0$$

Dans notre cas, $k=1$.

➔ $V_{rd,c} = 58,8 \text{ kN}$

Le terme $V_{Rd,f}$ est l'effort tranchant résistant apporté par les fibres :

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fv} \sigma_{Rd,f}}{\tan \theta}$$

Dans le cas de BFUP adoucissant ou peu écrouissant :

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K \gamma_{cf}} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma_f(w) dw$$

Où :

$$w_{lim} = \max(w_u, w_{max}) ;$$

$A_{fv} = b_w z$ est l'aire d'action des fibres où z est le bras de levier des efforts internes ;

θ est l'inclinaison sur l'axe neutre de la contrainte principale de compression. Il convient de retenir $\theta = 30^\circ$ comme valeur minimale ;

w_u est l'ouverture ultime des fissures atteinte à l'ELU, sur la fibre extrême, sous le moment agissant dans la section ;

w_{max} est l'ouverture maximale admissible des fissures.

➔ $V_{Rd,f} = 0,3 \text{ MN}$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f} = 359 \text{ kN}$$

→ Calcul de résistance des bielles de compression du béton : $V_{Rd,max}$

$$V_{Rd,max} = 2 \times 1,14 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{\frac{2}{3}} / (\cot\theta + \tan\theta)$$

→ $V_{rd,max} = 131 \text{ kN}$

Nous avons donc : $V_{Rd,total} = 131 \text{ kN}$

L'effort tranchant dû à la charge : $V_{Ed} = (p \times L)/2 = 8,8 \text{ kN}$ avec p charge uniformément répartie par mètre linéaire de poutre calculée sous combinaison d'action ELU.

→ $V_{Rd,total} > V_{Ed}$

La résistance du béton seul ($V_{Rd,c}$) est suffisante pour reprendre les efforts sollicitants. La vérification est largement satisfaite.

6.5.2. Vérifications à l'ELS

Les vérifications à réaliser à l'ELS sont : les limitations de contrainte en traction ; la maîtrise de la fissuration ; et les limitations des flèches.

6.5.2.1. Contrainte limite

Pour la contrainte en traction, il convient dans un premier temps de déterminer la contrainte de traction maximale sous chargement à l'ELS afin de justifier le choix de calcul en section fissurée ou non :

$$\sigma_t = \frac{M_{ser}}{I} \cdot y = 7,84 \text{ MPa}$$

La contrainte de traction sous chargement à l'ELS n'excède donc pas la contrainte limite élastique intrinsèque au matériau $f_{ctk,el}$, qui est de 8,0 MPa. La section ne fissure donc pas et ce calcul en section non fissurée est justifié : la vérification de la contrainte est donc validée.

6.5.2.2. Maîtrise de la fissuration

Le calcul de l'ouverture de fissure n'est pas nécessaire dans le cas des ouvrages provisoires, comme le coffrage perdu dans notre cas.

6.5.2.3. Flèche admissible

Lors de la vérification par rapport à la contrainte limite en traction, nous avons mis en évidence qu'à l'ELS, la section la plus sollicitée n'était pas fissurée. Par conséquent, nous pouvons calculer la flèche maximale en considérant le moment quadratique d'inertie en section non fissurée tout le long de la poutre, et le module d'élasticité instantané du BFUP en appliquant la formule de résistance des matériaux sous l'effet de la charge p uniformément répartie :

$$f = \frac{5Pl^4}{384EI} = 5,12mm$$

La flèche maximale autorisée des prédalles sous l'action du béton frais est de $l/300$ (CCTP), avec l la portée exprimée en mm. Dans notre cas, la flèche maximale à ne pas dépasser est de 6,28 mm, la flèche calculée est de 5,12 mm. La condition est donc vérifiée.

CONCLUSIONS

Ce chapitre présente la note de calcul du dimensionnement d'une première application BFUP pour l'entreprise Lagarrigue. Il s'agit de prédalles qui servent de coffrage perdu pour le remplacement d'un tablier de pont. Cette solution a été privilégiée car elle conduit à un allègement du poids du tablier, et à une simplification de sa réalisation grâce à la suppression du système d'étaisements pour son coulage. La note de calcul de ces éléments préfabriqués s'appuie sur la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) et la prénorme (PR NF P18-710) les calculs de structure en BFUP. La formulation 880-2%-MK de type BFUP-S établie lors du chapitre 2 a été utilisée pour la fabrication des prédalles. Les données matériaux utilisées proviennent de celles caractérisées lors de l'étude mécanique des BFUP présentée dans le chapitre 4. Les prédalles sont considérées comme des éléments épais vis-à-vis de la prénorme, d'une épaisseur de 4 cm. Par conséquent, les caractéristiques mécaniques, à savoir la résistance caractéristique en compression à 28 jours, et les résistances caractéristiques en traction, déterminées dans le chapitre 4 ont été utilisées pour les justifications de la section des prédalles. Le calcul de la section à l'ELU a été réalisé avec la méthode itérative proposée par (AFREM, 1995) en recherchant le moment résistant maximal de la section sous chargement à l'ELU. La section est justifiée à l'ELU car le moment résistant maximal est supérieur au moment sollicitant. La condition de non-fragilité à l'ELU a été validée. Quant à la justification à l'effort tranchant, il s'avère que la résistance du béton seul est suffisante pour

le reprendre. Les vérifications à l'ELS ont été également effectuées. La contrainte maximale en traction de la section sous sollicitations à l'ELS est inférieure à la résistance élastique en traction $f_{ctk,el}$. Le calcul de l'ouverture de fissure n'est pas imposé pour les prédalles puisqu'il s'agit d'ouvrages provisoires. La vérification de limitation de flèche a également été validée.

Cette première application industrielle constitue un aboutissement de ce projet de recherche. L'entreprise dispose désormais de matériaux BFUP utilisables pour de futures applications structurales notamment en BFUP. La future publication des normes matériaux et calcul en BFUP devrait également aider à la reconnaissance de ce nouveau matériau dans le domaine du Génie Civil, ainsi qu'à la prise en compte et à la considération de solutions à base de BFUP par les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage dans les réponses aux appels d'offre.

CONCLUSIONS GENERALES

Les Bétons Fibrés Ultra Performants se caractérisent par les performances mécaniques et de durabilité les plus élevées des matériaux à base cimentaire. Néanmoins, leur développement demeure freiné par leur coût et leur bilan carbone qui les rendent souvent peu compétitifs par rapport à des solutions techniques plus traditionnelles. L'utilisation de BFUP dans la réalisation des éléments de structure préfabriqués fait partie d'une stratégie d'optimisation structurelle, environnementale et économique de l'entreprise Lagarrigue. En effet, ces éléments sont généralement des pièces massives, de grandes dimensions, pouvant être fortement ferraillées. Le transport d'un grand nombre de ces pièces à travers la France constitue une contrainte forte en termes de coût et de production de gaz à effet de serre. Or, le BFUP permet de fortement réduire les sections des éléments, et donc leurs masses, les quantités de matériaux, dont les armatures en acier, voire de s'en dispenser. En outre, leur aptitude autoplaçante est particulièrement adaptée à la préfabrication. Tous ces avantages ont donc motivé la création d'un projet de recherche entre l'entreprise Lagarrigue et le LMDC dont l'objectif de mettre au point un process de préfabrication d'éléments à base des formulations de BFUP originales propres à l'entreprise. Le cœur de ce travail a résidé en la mise au point de formulations de matériaux qui puissent atteindre des performances conformes à la future norme de ce matériau pour pouvoir prétendre à la dénomination de BFUP, et qui soient à faibles coûts et impacts environnementaux afin que cette solution soit compétitive et pérenne. Les chapitres de ce mémoire retracent les différentes étapes qui ont permis d'atteindre en grande partie les objectifs fixés.

Le chapitre 1 consacré à la revue bibliographique a permis de dresser un bilan non exhaustif de l'état de connaissances sur les BFUP. Ces matériaux à base cimentaire aux propriétés exceptionnelles se distinguent par des résistances caractéristiques à la compression supérieures à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa. Bien qu'il n'existe pas de méthode de formulations, il faut privilégier l'utilisation de ciment de type CEM I PM ES de faible teneur en C3A, de sable siliceux fins de grains de forme ronde, d'additions hautement pouzzolaniques telles que la fumée de silice ou le métakaolin, et des fibres métalliques, pour des BFUP structuraux, dont le dosage volumique offrant le meilleur compromis coût/performance est compris entre 2 et 2,5% (AFGC, 2013). En outre, le rapport E/C doit être faible, autour de 0,2 voire inférieur, d'où l'ajout de superplastifiant haut réducteur d'eau pour assurer une bonne ouvrabilité. La clé des performances des BFUP réside dans leur grande compacité qui requiert une quantité de liant très souvent supérieure à 1000 kg.

L'utilisation de tous ces matériaux induit un coût bien plus élevé que celui des bétons ordinaires de l'ordre de 700 à 900 euros/m³ par rapport à 60 euros/m³. Ils peuvent être confectionnés dans des malaxeurs à fort gradient de cisaillement mais aussi dans un malaxeur à béton ordinaire à volume néanmoins plus réduit, correspondant généralement à la moitié de leur capacité. Deux types de traitements thermiques peuvent également être appliqués afin soit d'accélérer la prise à des températures modérées, soit de favoriser la formation d'hydrates plus résistants à des températures supérieures couplées à l'ajout de quartz broyé. A l'état frais, les formulations de BFUP sont généralement autoplaçantes et ont un caractère thixotrope lié au grand volume de pâte et au faible rapport E/C. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, outre la résistance en compression évoquée précédemment, celle en traction est généralement supérieure à 6 MPa, et grâce à l'ajout des fibres, notamment métalliques, le comportement post-fissuration est significativement amélioré. Les déformations différées libres de retrait sont principalement endogènes, de l'ordre de 550 µm/m (AFGC, 2013) et sont relativement élevées du fait du faible rapport E/C, alors que celles de dessiccation sont réduites, environ 150 µm/m, de par leur forte compacité et la faible quantité d'eau. Le coefficient de fluage qui caractérise les déformations différées sous charge maintenu dans le temps a une valeur faible comprise entre 0,8 et 1 pour les BFUP sans traitement thermique grâce à leur compacité. La durabilité des BFUP est estimée comme potentiellement très élevée (AFGC, 2013). D'après diverses études, leur porosité accessible à l'eau, leur perméabilité, leur diffusion aux chlorures sont extrêmement réduites par rapport à celles des bétons ordinaires, grâce à leur extrême compacité. Les retours d'expériences sur ouvrages et les essais couplés des propriétés de transfert sous contraintes mécaniques confirment ces résultats. Ce chapitre s'est achevé avec la description des ouvrages existants en BFUP, et avec la présentation de la méthode de dimensionnement de la future norme calculs (PR NF P18-470) couplée à celle de la prénorme matériaux (PR NF P18-710). Malgré ces propriétés remarquables, leur utilisation reste à l'heure actuelle restreinte, et pour pouvoir élargir leur champ d'application, il est indispensable de proposer de nouvelles formulations plus économiques, tout en maintenant des performances mécaniques et de durabilité équivalentes respectant les exigences des futures normes BFUP.

La mise au point de quatre formulations de BFUP à moindre coût de production par rapport à ceux existant sur le marché actuel a été traitée dans le chapitre 2. Pour atteindre cet objectif, le cahier des charges suivant a été établi : incorporer des matériaux locaux, sable siliceux et métakaolin comme ultrafine pouzzolanique, 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. Le premier concerne la forte capacité d'absorption d'eau du métakaolin non prise en compte par la norme (NF EN 206, 2014) dans le calcul de l'eau totale et qui affecte la maniabilité, la mise en œuvre et donc les résistances. Le second est lié à l'amélioration de la compacité par la recherche de l'optimum du couple ciment/métakaolin. Nous avons ainsi pu proposer 3 compositions de BFUP à base de métakaolin tenant compte de ces deux paramètres. La première 880-2%-MK contient 880 kg de ciment, a un rapport MK/C de 30%, et une fraction volumique de 2% de fibres métalliques. La deuxième 680-2%-MK découle de la première mais ne contient que 680 kg de ciment. La troisième BFUP 880-1,5%-MK dérive également de 880-2%-MK mais n'incorpore que 1,5% de fibres. Les deux dernières formulations présentent l'intérêt de réduire le coût du matériau et son impact environnemental. Une formulation de référence 880-2%-FS à base de fumée de silice a également été établie afin de comparer les propriétés de cette dernière avec celles à base du métakaolin. A l'état frais, les quatre formulations sont autoplaçantes. A l'état durci, les performances mécaniques obtenues ont montré l'intérêt de l'étude de compacité humide et de la prise en compte de l'eau absorbée par le métakaolin, et la pertinence de substituer la fumée de silice par le métakaolin avec des résistances équivalentes entre le 880-2%-MK et le 880-2%-FS et légèrement inférieures pour ceux avec moins de ciment et moins de fibres. Le remplacement de la fumée de silice par le métakaolin induit une diminution du coût matériaux d'environ 13%. Dans l'optique d'industrialiser les BFUP établis au laboratoire, une étude comparative de confection dans différents types de malaxeur a démontré la faisabilité de produire un BFUP aux propriétés équivalentes à celles obtenues en laboratoire dans le malaxeur à béton traditionnel de l'entreprise Lagarrigue. L'étude de l'influence des conditions de cure sur les propriétés mécaniques a montré qu'il est fortement recommandé de protéger les éléments préfabriqués de la dessiccation durant au moins les 7 premiers après le coulage pour garantir les propriétés les plus proches possibles de celles obtenues en cure humide à 20°C.

L'étude du comportement à l'état frais, 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. Les propriétés déterminées à la fin du malaxage ont montré que tous les BFUP

peuvent être considérés comme autoplaçants avec des valeurs d'étalement au mini cône comprises entre 30 et 34 cm. L'étude rhéologique a mis en évidence des temps d'écoulement et des viscosités plastiques supérieures dans le cas des formulations à base de métakaolin attribuables à une morphologie irrégulière de type plaquette des grains de cette ultrafine moins favorable à l'écoulement que celle des grains de la fumée de silice de forme plus arrondie. Les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK, de volume de pâte et de fibres quasiment comparables, présentent un seuil statique très proche. Une réduction de la valeur de ce seuil est constatée lorsque la teneur en liant ou en fibres est réduite. L'évolution des propriétés à l'état frais en fonction du temps de repos montre une augmentation de tous les paramètres, sauf pour la viscosité plastique de la formulation à base de fumée de silice. Cette différence de comportement traduit une restructuration supérieure pour les BFUP avec métakaolin qui affecte leur aptitude à l'écoulement dans le temps. Toutes les formulations de BFUP sont thixotropes selon la classification proposée par (Roussel, 2006a), ce caractère étant plus accentué pour celles à base de métakaolin, notamment pour le 880-2%-MK qui contient le plus de pâte et de fibres. A partir de ces résultats, d'après (Roussel, 2006a), un temps critique au-delà duquel une interface de reprise de bétonnage préjudiciable pour les performances mécaniques et de durabilité peut se former lors d'un coulage en multicouches, peut être estimé. Le temps critique le plus court est de 26 minutes pour le 880-2%-MK. Des préconisations à base de solutions simples à mettre en œuvre pour résoudre ce problème ont été proposées.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude du comportement mécanique des quatre formulations de BFUP. Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- les meilleures résistances caractéristiques en compression ont été obtenues pour les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK avec 150 et 152 MPa respectivement à 28 jours. Les deux autres formules 680-2%-MK et 880-1,5%-MK ont des résistances inférieures, respectivement de 129 et de 131 MPa.
- les résistances élastiques caractéristiques en traction $f_{ctk,el}$ sont comprises entre 5,9 et 8,0 MPa. La valeur maximale de 8,0 MPa a été obtenue pour les formules 880-2%-FS et 880-2%-MK. Les valeurs caractéristiques de résistance post-fissuration f_{ctfk} sont comprises entre 4,0 et 7,0 MPa.

Conformément à la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) par rapport aux résistances caractéristiques en compression, les formules 880-2%-FS, 880-2%-MK sont

classées en BFUP-S et sont utilisables pour les structures. La formule 880-1,5%-MK appartient à la classe BFUP-Z et peut être utilisée pour des applications autres que structurales (architectonique, revêtement imperméable, etc.). La formule 680-2%-MK ne peut être classée en tant que BFUP au sens de la prénorme (PR NF P18-470), néanmoins sa résistance caractéristique est très proche de celle exigée. Vis-à-vis de la traction, les BFUP 880-2%-MK et 880-2%-FS, et 880-1,5%-MK peuvent être classés T2 peu écrouissant. Quant à la formule 680-2%-MK, qui contient le moins de liant, sa résistance élastique légèrement inférieure à la limite recommandée (PR NF P18-470), ne permet pas de la classer en tant que BFUP. L'étude du retrait démontre que les valeurs sont conformes à celles recommandées par (PR NF P18-470) et que la formule à base de fumée de silice développe des amplitudes de retrait total et endogène plus importantes que celles des BFUP avec métakaolin, mais un retrait de dessiccation et un séchage moindres. Les fluages propre et total du 880-2%-MK sont inférieurs à celui du 880-2%-FS. Cette différence peut être attribuée à l'amélioration de la compacité de la formule 880-2%-MK, et à la possible quantité supérieure de C-S-H secondaires formés dans le BFUP à base de fumée de silice, sachant que les glissements des feuillettes de ces types d'hydrates sont considérés comme étant à l'origine de ces déformations. Le coefficient de fluage du 880-2%-MK est inférieur à 0,8, critère des BFUP sans traitement thermique (PR NF P18-470), alors que le 880-2%-FS le dépasse légèrement.

Le chapitre 5 est consacré à l'étude de la microstructure de deux pâtes caractéristiques des BFUP à base de métakaolin et de fumée de silice et celle de la durabilité des quatre BFUP. Les différentes analyses de microstructure ont montré une forte présence d'anhydres résiduels du ciment. Alors que les résultats de ces analyses sont comparables à 7 et 28 jours, l'absence de portlandite et la plus forte proportion de C-S-H secondaires à 90 jours, semblent démontrer la pouzzolanité supérieure de la fumée de silice par rapport au métakaolin. Ce résultat semble confirmer l'hypothèse émise pour expliquer ceux du fluage. Les valeurs des indicateurs généraux de durabilité, à savoir la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'azote, la diffusion des ions chlorures, et la carbonatation évalués pour les quatre BFUP sont conformes à celles préconisées par la prénorme (PR NF P18-470), sauf pour la perméabilité à l'azote, sachant néanmoins que les valeurs obtenues sont en accord avec celles de la littérature pour les BFUP sans traitement thermique. Les indicateurs évalués ont montré une durabilité potentielle très élevée d'après (AFGC, 2004). Ceci signifie que nos matériaux ont une résistance très élevée aux agressions des agents chimiques, ce qui permet d'assurer une bonne

protection des armatures acier, mais aussi des fibres métalliques et de garantir la maintien des performances mécaniques en traction.

Ce travail de recherche a connu un aboutissement, présenté dans le dernier chapitre, avec la première application industrielle, à savoir des éléments préfabriqués en BFUP coulés par l'entreprise Lagarrigue. Ces éléments en BFUP non armés sont des prédalles qui servent de coffrage perdu pour le remplacement d'un tablier de pont. Cette solution a été adoptée car elle permet un allègement du poids du tablier, une simplification et une rapidité de réalisation grâce à la suppression du système d'étaisements. La note de dimensionnement de ces prédalles basée sur les recommandations de (AFGC, 2013), et la prénorme (PR NF P18-710) de calculs de structure en BFUP a été détaillée dans ce dernier chapitre. La formulation la plus performante à base de métakaolin 880-2%-MK a été utilisée pour cette application.

L'entreprise dispose désormais d'une palette de matériaux BFUP ainsi que leur process de fabrication et des outils de base de dimensionnement pour la réalisation des futures applications structurales ou autres en BFUP.

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 métakaolin sont caractérisés par une viscosité plastique élevée, qui est due à la forme irrégulière des grains de métakaolin. 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. Il serait donc nécessaire de retravailler ces formulations afin de réduire cette grandeur, par l'utilisation d'un agent réducteur de viscosité par exemple. Ceci pourrait également réduire le coefficient thixotropique de ces BFUP qui a également un effet néfaste sur leurs performances en cas de coulages en multicouches pour des pièces volumineuses.

A l'état durci, une composition de béton notée 680-2%-MK n'a pas été classée réglementairement en tant que BFUP selon (PR NF P18-470). 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 entre 28 et 90 jours a été constatée sur nos matériaux. Une activation thermique qui accélérerait les réactions d'hydratation permettrait d'atteindre dès 28 jours les performances mesurées actuellement à 90 jours. Cette solution doit évidemment être réfléchie plus globalement vis-à-vis des bilans énergétique et économique. Vues leurs performances intéressantes et leur coût plus réduit en matériaux, les deux formulations avec des faibles dosages en fibres et en liant mériteraient également d'être améliorées pour pouvoir être classées BFUP structuraux. Pour des applications non structurales, plutôt architectonique, un travail pourra être mené sur l'une de ces deux formulations actuellement classées BFUP-Z afin d'améliorer l'état du parement de manière notamment à réduire le bullage de surface (étude des cires/huiles de décoffrage, du matériau de coffrage et de leurs interactions avec le BFUP, viscosité du BFUP à réduire pour limiter l'entraînement d'air, etc.).

La caractérisation de la loi de comportement en traction par flexion pour les éléments de type minces n'a pas été traitée. Il sera indispensable de réaliser cette caractérisation pour les formules 880-2%-MK et 880-1,5%-MK afin de compléter la base des données de l'entreprise Lagarrigue. En ce qui concerne les données des déformations différées, elles doivent être exploitées de manière approfondie et être confrontées aux modèles réglementaires ou à des modèles phénoménologiques plus fins. L'absence singulière de fluage de dessiccation dans le cas du BFUP avec métakaolin mériterait une étude pour apporter des éléments d'explication. En complément, vu le lien évident avec le fluage de dessiccation, on pourrait envisager d'étudier plus finement le séchage de ces matériaux, par exemple par des essais d'isotherme de sorption et désorption.

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 métakaolin, avec un suivi dans le temps. Pour les propriétés de transfert, les résultats de la porosité accessible à l'eau obtenus sont conformes à la limite préconisée par (PR NF P-18-470). Néanmoins, 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 et de fluage. Les valeurs de coefficients de perméabilité au gaz obtenues sont supérieures à celle recommandée par (PR NF P-18-470). Une campagne d'essai pourrait être menée pour vérifier ces mesures avec des débitmètres comportant des étendues de mesures adaptées pour de faibles valeurs de débit.

Enfin, au niveau du dimensionnement, développer ou adapter un modèle numérique plus pointu de calcul du comportement mécanique tenant compte des lois de comportement des BFUP, de type 2D notamment, offrirait la possibilité d'optimiser, dans l'optique de les réduire, les formes et sections en fonction des actions sur la structure, et de diminuer le coût des éléments préfabriqués.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acker, P., Ulm, F.-J., 2001. Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. *Nucl. Eng. Des.* 203, 143–158.
- AFGC, SETRA, 2002. Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations provisoires, AFGC, France.
- AFGC, SETRA, 2004. Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité, AFGC, France.
- AFGC, SETRA, 2013. Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations, AFGC, France.
- AFPC-AFREM, 1997. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Toulouse.
- AFREM, 1995. AFREM - BFM. Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenance et de contrôle. *Eléments de structures fonctionnant comme des poutres.*
- Ahari, R.S., Erdem, T.K., Ramyar, K., 2015. Time-dependent rheological characteristics of self-consolidating concrete containing various mineral admixtures. *Constr. Build. Mater.* 88, 134–142.
- Aïtcin, P.-C., Lachemi, M., Adeline, R., Richard, P., 1998. The Sherbrooke reactive powder concrete footbridge. *Struct. Eng. Int.* 8, 140–144.
- Andrade C, Torres J, 2013. Long term carbonation of UHPC. In: Toutlemonde F, Resplendino J, eds. *Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete.* Marseille, France. 249–256.
- Assaad, J., Khayat, K.H., Mesbah, H., 2003. Variation of formwork pressure with thixotropy of self-consolidating concrete. *ACI Mater. J.* 100.
- ASTM C230/C230M. Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement.
- Baby, F., 2012. Contribution à l'identification et la prise en compte du comportement en traction des BFUP à l'échelle de la structure. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- Ben Fraj, A., 2009. Transfert dans les bétons non saturés : Influence des laitiers et de l'endommagement mécanique. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Baron, J., 1982. Le béton hydraulique - connaissance et pratique - 2^{ème} partie : Le béton frais; chapitre 9 : Les principes de composition du béton de porosité minimale.
- Bastien Masse, M., 2010. Étude du comportement déformationnel des bétons de réparation. Thèse de doctorat. École polytechnique de Montréal.
- Bastien-Masse, M., Brühwiler, E., 2013. Poinçonnement de dalles composées en BFUP et béton armé. 14^e édition des journées scientifiques du Regroupement Francophones pour la Recherche et la formation sur béton (RF)²B, Sherbrooke, Québec, Canada.
- Bazant, Z., Chern, J., 1985. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism. *Mater. Struct.* 18, 1–20.
- Bazant Z.P., Hauggaard A.B., Baweja S., Ulm F.J., 1997. Microprestress-solidification theory for concrete creep. I. Aging and drying effect. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, pp.1188-1194.
- Bazant, Z. P., Cusatis, G., & Cedolin, L., 2004. Temperature effect on concrete creep modeled by microprestress-solidification theory. *Journal of engineering mechanics*, 130(6), 691-699.

- Behloul, M., 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.
- Benboudjema F., 2002. Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitation biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires. Thèse de doctorat. Université de Marne la Vallée, 258p.
- Billberg, P., 2003. Form pressure generated by self-compacting concrete. Presented at the 3rd International symposium on self-compacting concrete, pp. 271–280.
- Bissonnette, B., Pigeon, M., 1995. Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. *Cem. Concr. Res.* 25, 1075–1085.
- Bissonnette, B., Pigeon, M., Vaysburd, A.M., 2007. Tensile creep of concrete: study of its sensitivity to basic parameters. *ACI Mater. J.* 104.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aïtcin, P.-C., 1997. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *ACI Mater. J.* 94.
- Bonneau, O., Vernet, C., 1998. Moranville, Optimization of the rheological behavior of reactive powder concrete. Presented at the Proceedings of the First International Symposium on HPC and RPC, Sherbrooke, Canada, pp. 99–118.
- Boumiz, A., 1995. Etude comparée des évolutions mécaniques et chimiques des pâtes de ciment et mortier à très jeune âge. Thèse de doctorat. Université Paris VII.
- Boulay, C., Rossi, P., Tailhan, J.-L., di Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, G., 2004. Uniaxial tensile test on a new cement composite having a hardening behaviour. *Fiber Reinf. Concr.* 61–68.
- BPEL, 1999. BPEL 91 révisé 99. Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites, Fasc. 62 (Titre premier, section 2 du CCTG).
- Braïke, S., Massicotte, B., Charron, J. P., 2002. Conception des ponts en bétons fibres à haute et ultra haute performance. Collection de la Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées LCPC.
- Brooks, J., Cabrera, J., Johari, M.M., 1999. 11 factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete. Presented at the Autogenous shrinkage of concrete: proceedings of the international workshop, organised by JCI (Japan Concrete Institute), Hiroshima, June 13-14, 1998, Taylor & Francis, p. 195.
- Brooks, J., Johari, M.M., 2001. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cem. Concr. Compos.* 23, 495–502.
- Brooks, J., Neville, A., 1977. A comparison of creep, elasticity and strength of concrete in tension and in compression. *Mag. Concr. Res.* 29, 131–141.
- Byfors, J., 1980. Plain concrete at early ages. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Casanova, P., 1995. Bétons renforcés de fibres métalliques: du matériau à la structure. Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant. Thèse de doctorat. Ecole nationale des ponts et chaussées.
- Cavill, B., Chirgwin, G., 2004. The world's first RPC road bridge at Shepherds Gully Creek, NSW. Presented at the Austroads Bridge Conference, 5th, 2004, Hobart, Tasmania, Australia.
- Cazacliu, B., Loukili, A., Abdi, B., Le Roy, R., 2006. Malaxage d'un béton fibré à ultra-hautes performances. *Bull. Lab. Ponts Chaussées* 107–120.
- Chanvillard, G., Aïtcin, P.-C., 1996. Pull-out behavior of corrugated steel fibers: Qualitative and statistical analysis. *Adv. Cem. Based Mater.* 4, 28–41.
- Chanvillard, G., Rigaud, S., 2003. Complete characterization of tensile properties of Ductal® UHPFRC according to the French recommendations. Presented at the Proceedings of the 4th

- International RILEM workshop High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, pp. 21–34.
- Charron, J.-P., Denarié, E., Brühwiler, E., 2008. Transport properties of water and glycol in an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation. *Cem. Concr. Res.* 38, 689–698. doi:10.1016/j.cemconres.2007.12.006
- Cherkaoui, K., 2010. Caractérisation de la microstructure et comportement à court et long terme d'un Béton de Poudre Réactive extrudable. Thèse de doctorat. Evry-Val d'Essonne.
- Cheyrezy, M., Behloul, M., 2001. Creep and shrinkage of ultra-high performance concrete. *Creep Shrinkage Durab. Mech. Concr. Quasi-Brittle Mater.* Édité Par F-J Ulm ZP Ba Ant FH Witmann Elsevier Camb. 527–538.
- Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L., 1995. Analyse de la microstructure du béton de poudres réactives (BPR). *Ann Inst Tech Batiments Trav. Publics* 539, 103–111.
- Colleparidi, S., Coppola, L., Troli, R., Colleparidi, M., 1997. Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *ACI Spec. Publ.* 173.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2012. Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications. *Constr. Build. Mater.* 26, 289–294. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.023
- Cyr, M., 1999. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires.
- Cyr, M., Mouret, M., 2003. Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: consequences on self-compacting concrete design. *ACI Spec. Publ.* 217.
- De Larrard, F., Sedran, T., 1999. Une nouvelle approche de la formulation des bétons. Presented at the *Annales du BTP*, pp. 39–54.
- De Larrard, F., Sedran, T., 1994. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cem. Concr. Res.* 24, 997–1009.
- Delsol, S., 2012. Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques. École Polytechnique de Montréal.
- Denarié, E., Bruhwiler, E., Znidaric, A., 2005. Full Scale Application of UHPFRC for the Rehabilitation of Bridges-from lab to the field. 5th FWPSAMARISSustainable Adv. Mater. Road Infrastruct.
- De Silva, P., Glasser, F.P., 1993. Phase relations in the system $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration. *Cem. Concr. Res.* 23, 627–639.
- Dhonde, H.B., Mo, Y., Hsu, T.T., Vogel, J., 2007. Fresh and hardened properties of self-consolidating fiber-reinforced concrete. *ACI Mater. J.* 104.
- Domone, P., 1974. Uniaxial tensile creep and failure of concrete. *Mag. Concr. Res.* 26, 144–152.
- Dreux, G., Festa, J., 1998. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles.
- Estellé, P., Lanos, C., Perrot, A., 2008. Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 154, 31–38.
- Farhat, F., Nicolaidis, D., Kanellopoulos, A., Karihaloo, B., 2007. High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC)—Performance and application to retrofitting. *Eng. Fract. Mech.* 74, 151–167.
- Francisco, P., 2012. Déformations différées des bétons fibrés à ultra hautes performances soumis à un traitement thermique. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- Gamble, B. R., & Parrott, L. J., 1978. Creep of concrete in compression during drying and wetting. *Magazine of concrete research*, 30(104), 129-138.

- Garas, V.Y., Kahn, L.F., Kurtis, K.E., 2009. Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete. *Cem. Concr. Compos.* 31, 147–152. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.01.002
- Garcia-Diaz, E., 1995. Réactivité pouzzolanique des métakaolinites: corrélations avec les caractéristiques minéralo-gitologiques des kaolinites. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Granger, L., 1995. Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires: analyse et modélisation. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des ponts et Chaussées.
- Graybeal, B.A., 2007. Complete characterization of tensile properties of Ductal® UHPFRC according to the French recommendations. *ACI Mater. J.* 104.
- Graybeal, B., Baby, F., Marchand, P., Toutlemonde, F., 2012. Direct and flexural tension test methods for determination of the tensile stress–strain response of UHPFRC. Presented at the Kassel international conference, HIPERMAT, pp. 395–418.
- Graybeal, B., Hartmann, J., 2005. Construction of an Optimized UHPC Vehicle Bridge. *ACI Spec. Publ.* 228.
- Grünewald, S., 2004. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. TU Delft, Delft University of Technology.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S., Mermerdaş, K., 2012. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Constr. Build. Mater.* 34, 120–130.
- Habel, K., 2004. Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., & Rossi, P. (2013). Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. *Cement and Concrete Composites*, 38, 1-11.
- Hajar, Z., Lecointre, D., Simon, A., Petitjean, J., 2004. Design and construction of the world first ultra-high performance concrete road bridges. Presented at the Proceedings of the Int. Symp. on UHPC, Kassel, Germany, pp. 39–48.
- Hassan, A., Jones, S., Mahmud, G., 2012. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Constr. Build. Mater.* 37, 874–882.
- Holschemacher, K., Wittmann, F., Klug, Y., Yuan, Y., Shah, S.P., Lü, H., 2003. Structural behaviour of fastenings in steel fibre reinforced concrete. Presented at the International Conference on Advances in Concrete and Structures, RILEM Publications SARL, pp. 939–946.
- Hughes, B., Fattuhi, N., 1976. The workability of steel-fibre-reinforced concrete. *Mag. Concr. Res.* 28, 157–161.
- Jensen, O.M., Hansen, P.F., 2001. Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. *Cem. Concr. Res.* 31, 647–654.
- Jungwirth, J., Muttoni, A., 2004. Structural behavior of tension members in Ultra High Performance Concrete. Presented at the International symposium on ultra high performance concrete, International Symposium on Ultra High Performance Concrete.
- JSCE, 2004. Recommendations for Design of UHSFRC Structures, Japan Society of Civil Engineers.
- Kamen, A., 2007. Comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Kanellopoulos, A., 2004. Autogenous shrinkage of CARDIFRC®.

- Kinuthia, J., Wild, S., Sabir, B., Bai, J., 2000. Self-compensating autogenous shrinkage in Portland cement—metakaolin—fly ash pastes. *Adv. Cem. Res.* 12, 35–43.
- Kollek, J.J., 1989. The determination of the permeability of concrete to oxygen by CEMBUREAU method - a recommendation. *Materials and Structures*, vol. 22, pp.225-230.
- Kono, K., Musha, H., Kawaguchi, T., 2013. Durability study of the first PC bridge constructed with ultra-high strength fiber reinforced concrete in Japan. In: Toutlemonde, F., Resplendino, J., Eds. *Proceedings of International Symposium on Ultra-high Performance Fiber-Reinforced Concrete*. Marseille, France.239-248.
- Kovler, K., 1999. A new look at the problem of drying creep of concrete under tension. *J. Mater. Civ. Eng.* 11, 84–87.
- Kwan, A., Li, L., Fung, W., 2012. Wet packing of blended fine and coarse aggregate. *Mater. Struct.* 45, 817–828.
- Ladaoui, W., 2010. Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs. Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Ladaoui, W., Vidal, T., Sellier, A., Bourbon, X., 2011. Effect of a temperature change from 20 to 50 C on the basic creep of HPC and HPFRC. *Mater. Struct.* 44, 1629–1639.
- Legrand, C., 1972. Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais. *Matér. Constr.* 5, 275–295.
- Leung Pah Hang, T., 2015. Les bétons bas pH: les comportements initial et différé sous contraintes externes. Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Loukili, A., 1996. Etude du retrait et du fluage de Bétons à Ultra-Hautes Performances. Thèse de doctorat.
- Loukili, A., Khelidj, A., Richard, P., 1999. Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. *Cem. Concr. Res.* 29, 577–584.
- Markovic, I., 2006. High-performance hybrid-fibre concrete—development and utilisation. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Matte, V., 1999. Durabilité des bétons à ultra hautes performances: rôle de la matrice cimentaire.
- Matte, V., Moranville, M., 1999. Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. *Cem. Concr. Compos.* 21, 1–9.
- Mazloom, M., Ramezani pour, A., Brooks, J., 2004. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* 26, 347–357.
- Mechling, J.-M., Lecomte, A., Merriaux, K., 2003. Mesure de l'absorption d'eau des additions minérales des bétons par évaporométrie. *Mater. Struct.* 36, 32–39.
- Murat, M., & Bachiorrini, A., 1982. Corrélation entre l'état d'amorphisation et l'hydraulicité du métakaolin. *Bull Minéral*, 105, 543-555.
- Naaman, A.E., 2007. High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications, in: *CBM-CI International Workshop*, Karachi, Pakistan. pp. 389–401.
- Naaman, A.E., Chandransu, K., 2004. Innovative bridge deck system using high-performance fiber-reinforced cement composites. *ACI Struct. J.* 101.
- Neville, A.M., 1981. *Properties of concrete*. Eyrolles, Paris, France, 806p.
- NF EN 1097-6, 2014. Norme. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- NF EN 12350-2, 2012. Norme. Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement.

- NF EN 12350-6, 2012. Norme. Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique.
- NF EN 12350-7, 2012. Norme. Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité.
- NF EN 12350-2, 2012. Norme. Essai pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement.
- NF EN 12350-8, 2010. Norme. Essai pour béton frais - Partie 8: béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.
- NF EN 934-2, 2012. Norme. Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour bétons - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.
- NF EN 206, 2014. Norme. Béton - Spécification, performances, production et conformité.
- NF EN 13670, 2013. Norme. Exécution des structures en béton.
- NF EN 13369, 2013. Norme. Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
- EN 12390-2, 2009. Norme. Essais pour béton durci - Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.
- NF EN 12390-3, 2012. Norme. Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.
- NF P18-411, 1981. Norme. Béton - Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs.
- NF EN 13263-1, 2009. Norme. Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité.
- NF P18-513, 2012. Norme. Addition pour béton hydraulique - Métakaolin - Spécifications et critères de conformité.
- NF EN 197-1, 2012. Norme. Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- NF EN 1990, 2003. Eurocodes structureaux. Base de calcul des structures.
- EN 1992-2, 2012, Eurocode 2. Calcul des structures en béton - Partie 2 : ponts en béton - Calcul des dispositions constructives.
- NTBuild 492, 1999. Recommandations. Concrete, mortar and cement based repair materials : chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments.
- Oesterlee, C., 2010. Structural response of reinforced UHPFRC and RC composite members. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Pane, I., Hansen, W., 2002. Early age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements. *Mater. Struct.* 35, 92–96.
- Parant, E., 2003. Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères: fatigue, choc, corrosion. Thèse de doctorat. Ecole des Ponts ParisTech.
- Parant, E., Pierre, R., Le Maou, F., 2007. Durability of a multiscale fibre reinforced cement composite in aggressive environment under service load. *Cem. Concr. Res.* 37, 1106–1114.
- Piérard, J., Doms, B., Cauberg, N., 2013. Durability evaluation of different types of UHPC. In: Toutlemonde, F., Resplendino, J., Eds. *Proceedings of International Symposium on Ultra-high Performance Fiber-Reinforced Concrete*. Marseille, France. 275-284.
- Pons, G., 1998. Caractérisation du comportement différé des bétons: de la réalité du matériau à la note de calcul. *Bull. Lab. Ponts Chaussées Spéc.* XX.
- PR NF P18-710, 2015 : Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP).

- PR NF P18-470, 2015 Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances - Spécification, performance, production et conformité.
- Proust, E., 2002. Retrait et fluage des bétons autoplacants : Vers une compréhension des comportements différés, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse.
- Pyo, S., Wille, K., El-Tawil, S., Naaman, A.E., 2015. Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension. *Cem. Concr. Compos.* 56, 15–24.
- Rahman, M., Baluch, M., Malik, M., 2014. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. *Constr. Build. Mater.* 50, 710–717.
- Resplendino, J., 2004. First recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of application. Presented at the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, pp. 79–90.
- Resplendino, J., Bouteille, S., 2006. Construction de deux ponts routiers en béton fibré ultra performant (BFUP). *OUVRAGES ART Bull. Inf.*
- Resplendino, J., Petitjean, J., Schnütgen, B., Vandewalle, L., 2003. French recommendations for ultra-high performance fiber-reinforced concretes. Presented at the International RILEM Workshop on Test and Design Methods for Steel fibers Reinforced Concrete, RILEM Publications SARL, pp. 91–103.
- Richard, P., Cheyrezy, M., 1995. Composition of reactive powder concretes. *Cem. Concr. Res.* 25, 1501–1511.
- RILEM, 1972. Recommandations RILEM CPC8, Modulus of elasticity of concrete in compression. *Materials and Structures*, 6(30), 507-512.
- RILEM TC 107-CSP, 1998. Recommandation. Creep and shrinkage prediction models: principles of their formation. October 1998.
- RILEM, TC 162 - TDF, 2000. Test and design method for steel reinforced concrete - Recommendations: σ - ϵ Design method. *Materials and Structures*, vol 33, pp.75-81.
- Rossi, P., 1998. Les bétons de fibres métalliques. Ed. Techniques Ingénieur.
- Rossi, P., 1997. High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): The LCPC experience. *ACI Mater. J.* 94.
- Rossi, P., 1992. Mechanical behaviour of metal-fibre reinforced concretes. *Cem. Concr. Compos.* 14, 3–16.
- Rossi, P., Arca, A., Parant, E., Fakhri, P., 2005. Bending and compressive behaviours of a new cement composite. *Cem. Concr. Res.* 35, 27–33.
- Rossi, P., Charron, J.P., Bastien-Masse, M., Tailhan, J.-L., Le Maou, F., Ramanich, S., 2013. Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete. *Mater. Struct.* doi:10.1617/s11527-013-0150-1
- Rossi, P., Renwez, S., Belloc, A., 1995. Les bétons fibres à ultra-hautes performances. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées.*
- Rougeau P, Boulet D, Shink M., 2000. Les bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP). Synthèses des connaissances et étude de faisabilité sur prototype de laboratoire, Document de CERIB DDI 002.
- Rougeau, P., Borys, B., 2004. Ultra-High-Performance Concrete with Ultra-Fine Particles Other than Silica Fume. Presented at the International Symposium on Ultra-High-Performance Concrete, pp. 13–15.

- Roussel, N., 2008. Thixotropie des bétons modernes: Modélisation et application. XXVIEMES RENCONTRES Univ. GENIE Civ. AUGC 2008.
- Roussel, N., 2006a. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cem. Concr. Res.* 36, 1797–1806.
- Roussel, N., 2006b. Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. *Mater. Struct.* 39, 501–509.
- Roussel, N., Cussigh, F., 2008. Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. *Cem. Concr. Res.* 38, 624–632.
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., Brumaud, C., 2012. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 42, 148–157.
- Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M., 1995. Etude Expérimentale sur la durabilité des Bétons de Poudres Réactives. *Ann. Inst. Tech. Bâtiment. Trav. Publics ITBTP Bétons Poudres Réactives BPR À Ultra Haute Résistance 200 À 800 MPa* 532, 133–141.
- Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M., 1996. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Saak, A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P., 2001. New methodology for designing self-compacting concrete. *ACI Mater. J.* 98.
- San Nicolas, R., 2011. Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- Sato, Y., Van Mier, J. G., Walraven, J. C., 2000. Mechanical characteristics of multi-modal fiber reinforced cement based composites. In *RILEM symposium on fibre-reinforced concretes* (pp. 791-800).
- Spasojevic, A., 2008. Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Spasojevic, A., Burdet, O., Muttoni, A., 2008. Applications structurales du béton fibré à hautes performances aux ponts. Rapport OFROU.
- Tafraoui, A., 2009. Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebailli, S., Vidal, T., 2009. Metakaolin in the formulation of UHPC. *Constr. Build. Mater.* 23, 669–674.
- Tailhan, J.-L., Rossi, P., Boulay, C., 2012. Tensile and bending behaviour of a strain hardening cement-based composite: experimental and numerical analysis. *Cem. Concr. Compos.* 34, 166–171.
- Taylor H.F.W., 1990. *Cement chemistry*. Academic press limited, London.
- Tavakoli, F., Bouteille, S., Toutlemonde, F., 2009. Application du projet de dalle gaufrée du PN MIKTI sur un ouvrage à Livron-Loriol, in: *Colloque International BFUP*.
- Tazawa, E., Miyazawa, S., 1997. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials. *Mag. Concr. Res.* 49, 15–22.
- Tazawa, E., Miyazawa, S., 1995. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. *Cem. Concr. Res.* 25, 281–287.
- TC162-TDF, R., 2000. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test. *Mater Struct* 33, 3–5.
- Toledo Filho, R.D., Koenders, E.A.B., Formagini, S., Fairbairn, E.M.R., 2012. Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability. *Mater. Des.* 36, 880–888. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.022

- Toutlemonde, F., Resplendino, J., Sorelli, L., Bouteille, S., Brisard, S., 2005. Innovative design of ultra high-performance fiber reinforced concrete ribbed slab: experimental validation and preliminary detailed analyses. *ACI Spec. Publ.* 228.
- Ulm, F.J., Acker, P., 1998. Le point sur le fluage et la recouvrance des bétons. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées spécial XX*, pp.73-82.
- Ulm, F.-J., Coussy, O., 1998. Couplings in early-age concrete: from material modeling to structural design. *Int. J. Solids Struct.* 35, 4295–4311.
- Verbeck, G., Copeland, L., 1972. Some physical and chemical aspects of high pressure steam curing. *ACI Spec. Publ.* 32.
- Vernet, C., Lukasik, J., Prat E., 1998. Nanostructure, porosity, permeability, and diffusivity of ultra-high performance concrete (UHPC). *Symposium international sur les bétons à hautes performances et de poudres réactives, Sherbrooke, volume 3*, p. 17-35.
- Vernet, C., 2002. Enseignements tirés des recherches sur les BFUP.[on-line]. *Lafarge Publ.* 20, 2010.
- Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C.A., Skoczylas, F., Corvez, D., 2014. Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging. *Cem. Concr. Res.* 55, 1–13.
- Wild, S., Khatib, J., 1997. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cem. Concr. Res.* 27, 137–146.
- Wild, S., Khatib, J., Roose, L., 1998. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement—metakaolin pastes. *Adv. Cem. Res.* 10, 109–119.
- Wille, K., El-Tawil, S., Naaman, A., 2014. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cem. Concr. Compos.* 48, 53–66.
- Wille, K., Naaman, A.E., El-Tawil, S., Parra-Montesinos, G.J., 2012. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. *Mater. Struct.* 45, 309–324. doi:10.1617/s11527-011-9767-0
- Wille, K., Naaman, A.E., Parra-Montesinos, G.J., 2011. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way. *ACI Mater. J.* 108.
- Wuest, J., 2007. Comportement structural des bétons de fibres ultra performants en traction dans des éléments composés. *Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.*
- Yang, S., Millard, S., Soutsos, M., Barnett, S., Le, T., 2009. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Constr. Build. Mater.* 23, 2291–2298.

ANNEXES

Annexe 1: Fiches techniques des constituants

CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF

Usine du TEIL

NF EN 197-1 NF P 15-317 XP P15-319 NF P 15-318

NF EN 196-10

Fiche produit
techniqueN° de certificat CE :
0333-CPD-1203

• Constituants et composition du ciment

Principaux (%)		Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs (g/t)	
Clinker	97	Calcaire (LL)	3	Gypse	2,7	Agent de mouture	AMA 14 1100
C3S	67,9	C4AF	7,9				
C3A	4,05	C2S	19,9				

• Caractéristiques physiques et mécaniques

	Valeur usine moyenne	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1)		Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002)	
		minimum	maximum	minimum	maximum
Résistance à la compression 1 jour (MPa)	18,9				
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	32,1	18		18	
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	67,5	50		50	
Retrait à 28 jours (µm/m)	624,3				
Début de prise (min)	181	40		60	
Stabilité (mm)	0,7		5		5
Masse volumique (g/cm ³)	3,16				
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3524,53				
Q12h (J/g)	199,3				
Q41h (J/g)	294,26				
L'	61,6				

• Caractéristiques chimiques (%)

MAXI : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1, NF P 15-318, NF P 15-317, XP P 15-319)

	Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI
SiO ₂	22,71		S--	0,10	0,20	Insolubles	0,35	0,75
Al ₂ O ₃	3,03	8,00	Cl-	0,10	0,10	CO ₂	0,84	
Fe ₂ O ₃	2,33		Perte au feu	1,33	3,00	CaO libre	0,54	
CaO	67,00		TiO ₂	ND			Valeur usine moyenne	Coef var (%)
MgO	0,95	3,00	Cr VI	< 2 PPM	2 PPM	Alcalins actifs	0,21	0,1
K ₂ O	0,17		P ₂ O ₅	0,08		Na ₂ OEq	0,21	
Na ₂ O	0,10		Non dosé	-0,03				
SO ₃	2,13	2,50	IS	< 23,5	23,50			
Total : 100								

Ces valeurs, extraites de notre autocontrôle, permettent de vérifier la conformité de notre produit aux spécifications normatives et donnent une indication pour les caractéristiques complémentaires. Elles ne constituent pas un engagement sur les résultats à venir.

■ : Caractéristique modifiée / fiche précédente ND : non dosé

Révision du 18/03/2011

Le Teil : livraison en sac et en vrac



Notice technique
Edition 03.2015
 CONDENSIL® S95 DM

CONDENSIL® S95 DM

Fumée de silice densifiée, addition pour bétons haute durabilité et hautes, très hautes et ultra hautes performances

Conforme à la Norme NF EN 13263-1,2 : 2009, Marquage CE

N° d'enregistrement REACH 01-2119486866-17-0005

Code CAS 69012-64-2

Code EINECS 273-761-1

CARACTERISTIQUES GENERALES	
Présentation	CONDENSIL® S95 DM est une fumée de silice ultrafine obtenue lors de la fabrication du silicium.
Domaines d'application	<p>La fumée de silice CONDENSIL® S95 DM permet de fabriquer des :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Bétons à haute durabilité résistants en milieux agressifs : <ul style="list-style-type: none"> - domaines agricoles : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation... - milieu industriel : industries chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de rétention... - stations-service : béton en contact d'huiles et de carburants - milieu marin : digue, aménagement portuaire ... - zone de montagne : présence d'eau pure, d'eau séléniteuse + gel dégel ou de sels de déverglaçage - stations d'épuration, égouts, caniveaux... ■ Bétons à hautes résistances (BHP, BTHP et BUHP) ■ Bétons pompables ■ Bétons projetés
Caractères généraux	<p>CONDENSIL® S95 DM confère aux bétons les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ améliore les performances mécaniques à long terme : résistances en compression, flexion et traction ■ augmente le module d'élasticité ■ réduit le fluage ■ améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion ■ améliore la durabilité en milieux agressifs ■ diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction et de la réaction sulfatique interne (RSI) ■ diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides ■ facilite le pompage de tous les bétons même peu dosés en ciment ■ réduit le risque de ségrégation du béton
CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	
Coloris	Gris
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vrac (toutes quantités jusqu'à 25 tonnes = ≈ 55 m³) ■ Big bag (≈ 900 kg)
Stockage	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vrac : silo étanche d'un volume suffisant et spécialement équipé (nous contacter). ■ Big bag dans un local à l'abri de l'humidité.
Conservation	En silo ou dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.

DONNEES TECHNIQUES		
	EN 13263 - 1,2 : 2009*	Valeurs observées**
Densité apparente	0.45 ± 0.1	0.45 ± 0.05
Densité réelle	2.24	
Surface spécifique BET (m ² /g)	Entre 15 et 35	22 ± 2
Teneur en SiO ₂	≥ 85 %	95 % ± 2
Teneur en Si élémentaire	≤ 0.4 %	0.14 % ± 0.05
Teneur en Na ₂ O équivalent	≤ 1.0 %	0.75 % ± 0.5
Teneur en SO ₃	≤ 2.0 %	0.35 % ± 0.50
Teneur en Cl-	≤ 0.1%	0.01 % ± 0.01
Indice d'activité à 28 j	≥ 100	≥ 105
Perte au feu	≤ 4.0 %	2 % ± 0.5
Teneur CaO	≤ 1.0%	0.8 % ± 0.1
	<i>* Valeurs contractuelles</i>	<i>** Valeurs non contractuelles</i>
CONDITIONS D'UTILISATION		
Consommation / Dosage	Le dosage peut être compris entre 5 à 10 % du poids du ciment. Le dosage le plus courant est de 8 % du poids du ciment.	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ■ CONDENSIL® S95 DM doit être pesé dans la bascule à ciment avec le ciment pour le vrac ou introduit avec le ciment. ■ Afin d'obtenir toutes les performances de CONDENSIL® S95 DM, il est indispensable de défloculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, CONDENSIL® S95 DM doit être systématiquement associé avec un superplastifiant, haut réducteur d'eau. 	
Précautions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> ■ L'emploi d'un masque est obligatoire lors de son utilisation ■ Fiche de données de sécurité fournie sur demande. 	
Mentions légales	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.</p> <p>«Les informations sur la présente notice et, en particulier, les recommandations relatives à l'utilisation finale des produits sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société CONDENSIL a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et utilisés dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nous sommes à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une utilisation non conforme à nos renseignements. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande».</p>	



CONDENSIL
265 RUE DES EPINETTES
ZONE DES LANDIERS NORD
73000 CHAMBERY

Tél. 00 33 4 79 62 74 03
Fax 00 33 4 79 96 35 94
E-mail condensil@vicat.fr

1 – DEFINITION

argicem[®] est un métakaolin obtenu par calcination « Flash » d'une argile kaolinique. Ce procédé original de calcination, à faible consommation d'énergie et à faible émission de CO₂, s'inscrit dans le cadre du Développement Durable.

argicem[®] une addition pouzzolanique de type II pour bétons et mortiers conforme à la norme NF P18-513 d'Août 2012.

Sa dénomination est la suivante :

Métakaolin (norme NF-P18-513)-A-F_M-W_M


2 – MODE D'ACTION

argicem[®] est un produit de grande surface spécifique qui contribue activement aux résistances mécaniques du béton par réaction pouzzolanique.

La chaux libérée au cours de l'hydratation du ciment, la Portlandite, est consommée pour former de nouveaux hydrates stables et insolubles.

La compacité, la durabilité et l'esthétique du béton sont donc considérablement améliorées par **argicem[®]**.

3 – DOMAINE D'UTILISATION

argicem[®] peut être utilisé dans tous types de béton dans le domaine de la préfabrication et du béton prêt à l'emploi, en particulier dans :

- les bétons à démoulage immédiat ;
- les bétons à haute résistance chimique ;
- les bétons étuvés ;
- les bétons architectoniques ;
- les bétons et mortiers autoplaçants ;
- les éléments en béton fibré (fibres de verre, fibres polyester,...) ;
- les mortiers (maçonnerie, enduits de finition,...).

4 – MISE EN OEUVRE

Les dosages en **argicem[®]** préconisés dans les mortiers et bétons et selon les applications, varient entre 5 et 25% en substitution du poids du ciment. Le taux de substitution à hauteur de 25% présente le meilleur compromis économique tout en conservant ou améliorant les propriétés mécaniques et de durabilité du béton.

Son utilisation peut nécessiter l'emploi d'un plastifiant ou super plastifiant approprié.

5 – PROPRIETES

A l'état frais, **argicem[®]** limite le ressuage et fait partie des métakaolins de faible demande en eau.

Pendant la prise, **argicem[®]** diminue également la chaleur d'hydratation (bétons massifs).

A l'état durci, **argicem[®]** :

- diminue la porosité et donc la pénétration des agents agressifs (chlorures,...) ;
- améliore la résistance chimique et la résistance aux cycles de gel-dégel ;
- évite l'apparition des phénomènes d'efflorescence ;
- diminue les retraits endogène et total ;
- diminue les risques d'alcali réaction et de réactions sulfatiques.

6 – CARACTERISTIQUES

• Composition chimique

Paramètre recherché	Norme appliquée	Seuil maxi ou mini	Résultat d'essai
SiO ₂ + Al ₂ O ₃	(NF EN 196-2)	>90%	93,16 %
Chlorures	(NF EN 196-2)	<0,1%	0,003 %
Sulfates	(NF EN 196-2)	<1%	0,14 %
CaO libre	(NF EN 451-1)	<1%	0,36 %
Alcalins équivalents	(NF EN 196-2)	-	<0,01 %
Oxyde Magnésium	(NF EN 196-2)	<1%	0,04 %
Perte au feu	(NF EN 196-2)	<4%	1,63 %
Fixation de l'hydroxyde de calcium	Essai Chapelle modifié	>700mg/g	754 mg/g

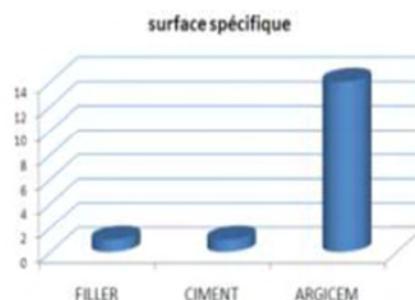
• Caractéristiques physiques

Valeur au Bleu de méthylène	(NF EN 933-9)	<10 g/kg	7,55 g/kg
Surface spécifique BET	(NF ISO 9277)	≥12,5 m ² /g	16 m ² /g
Masse volumique	(NF EN 1097-7)	-	2500 kg/m ³
Masse volumique en vrac	-	-	700 ± 100 kg/m ³
Indice d'activité 28 j	-	> 100% pour le type A	i ₂₈ = 105,5 sur mortier normalisé
Ecart sur le temps de début de prise	-	<25%	1,22 %
Rapport de demande en eau	-	<1,15 pour W _M	1,06
Absorption d'eau	-	-	18%
Passant à 0,063 mm	-	>70%	74,5 %
Passant à 0,08 mm	-	-	≥80%
Passant à 0,125 mm	-	-	≥95%

Valeurs moyennes sur la période mai 2011 à mai 2012 données à titre indicatif

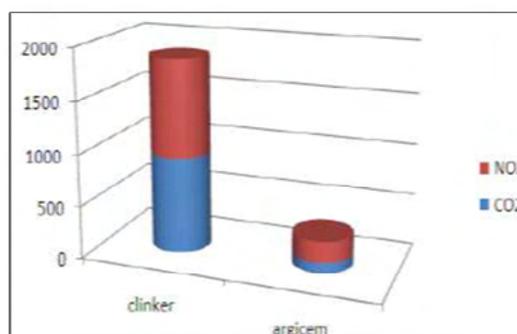
Se référer à la norme NF P 18-513 pour les conditions de réalisation de ces essais.

Les conditions d'utilisation doivent cependant être déterminées après des essais de convenance sur béton prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées.



7 – ENVIRONNEMENT

Emission de gaz à effet de serre en kg équivalent CO₂ par tonne produite de liant base clinker et d'argicem.



8 – CONDITIONNEMENT STANDARD

Vrac. (Big bag sur commande).

9 – PRECAUTIONS D'EMPLOI

argicem[®] fait l'objet d'une fiche de données de sécurité.

Annexe 2 : Détermination de la loi contrainte-ouverture de fissure par application de la méthode d'analyse inverse

La méthode inverse utilisée est basé sur une approche discrète avec une modélisation de la section fissurée permettant d'obtenir une relation contrainte de traction en fonction de l'ouverture de fissure comme l'illustre la Figure A - 1. La section fissurée est composée de deux parties, une partie non fissurée où le comportement est élastique linéaire, et une partie fissurée où la distribution des contraintes dépend de l'efficacité des fibres (caractéristiques intrinsèques au matériau).

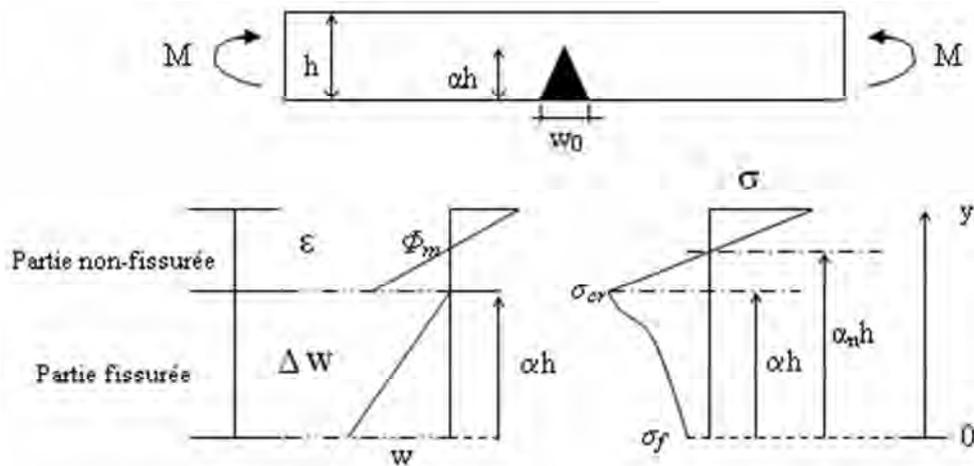


Figure A - 1 : Représentation de la section fissurée du prisme en flexion selon (AFGC, 2013)

L'équilibre mécanique de la section en termes des efforts normaux et des moments permet d'écrire les équations suivantes :

$$N_b = \frac{E \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} [(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2] \quad (\text{A - 1})$$

$$N_f = \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w_0} \int_0^{w_0} \sigma_f \cdot dw \quad (\text{A - 2})$$

$$N_b + N_f = 0 \quad (\text{A - 3})$$

$$M_b = \frac{E \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} [(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b \quad (\text{A - 4})$$

$$M_f = \alpha \cdot h \cdot N_f - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w_0} \int_0^{w_0} \sigma_f \cdot w \cdot dw \quad (\text{A - 5})$$

$$M_b + M_f = M_{résistance} \quad (\text{A - 6})$$

La position de l'axe neutre est donnée par la relation :

$$\sigma_t = E \cdot \chi_m \cdot b \cdot h \cdot (\alpha - \alpha_n) \quad (\text{A} - 7)$$

Avec :

- b : largeur du prisme (mm)
- h : hauteur du prisme (mm)
- E : module du matériau (MPa)
- α la hauteur relative de la fissure
- α_n la hauteur relative de l'axe neutre
- χ_m la courbure de la partie non fissurée (mm^{-1})
- σ_t la résistance en traction de la matrice (estimée à partir des essais de flexion quatre points) (MPa)

L'ouverture de fissure w s'exprime en fonction de la courbure χ_m par la relation suivante :

$$w_0 = [\chi_m + 2 \cdot \chi_e] \frac{2 \cdot (\alpha h)^2}{3} \quad (\text{A} - 8)$$

Avec χ_e la courbure élastique équivalente, donnée par : $\chi_e = \frac{M}{EI}$, où I est l'inertie de la section. Cette équation suppose que la courbure varie paraboliquement entre la fissure et la zone de flexion élastique et que la zone perturbée s'étend chaque côté de la fissure sur une distance égale à la hauteur fissurée (αh) comme l'illustre la Figure A - 2. (Casanova, 1995) a fait l'hypothèse que l'ouverture de fissure varie linéairement sur la hauteur fissurée et l'angle d'ouverture est égal à l'intégrale des déformations courbures.

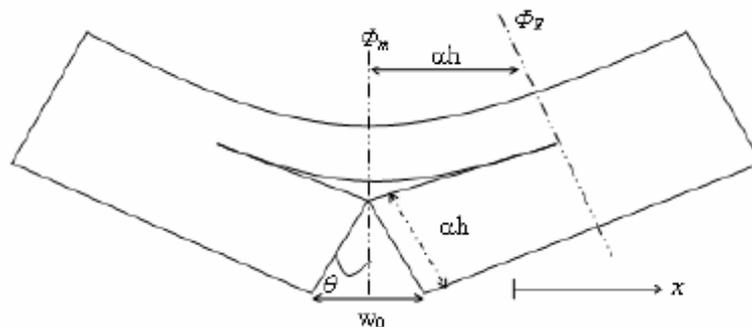


Figure A - 2 : Hypothèse de la zone de fissure (Casanova, 1995)

Le système comporte 4 inconnus (σ_f , χ_m , α , et α_n) et 4 équations sont disponibles. Il est donc possible de réaliser une analyse inverse en utilisant un processus itératif. Pour cela, il faut considérer deux états de chargement successifs (i) et (i+1). L'ouverture de fissure va donc évoluer entre deux états (w_i) et (w_{i+1}) et la contrainte correspondant (σ_{fi}) et (σ_{fi+1}). Il est à noter que la position de l'axe neutre et la courbure de la partie non fissurée changent également. Il est donc possible d'exprimer les équations précédentes de manière incrémentales (à l'état i+1) :

$$N_{fi+1} = N_{fi} \cdot \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} + \alpha_{i+1} \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{\sigma_{fi} + \sigma_{fi+1}}{2} \right) \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)$$

$$M_{fi+1} = M_{fi} \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} \cdot h \cdot N_{fi+1} \cdot \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) - \frac{b \cdot (\alpha_{i+1} \cdot h)^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 \cdot \sigma_{fi+1}$$

En considérant que des variables (N_f , M_f) de l'état (i) sont connus, il est donc possible de connaître les inconnues (σ_f , χ_m , α , et α_n) de l'état (i+1). Ainsi, la loi (σ - w) est obtenue à partir de la courbe expérimentale (M - w). Avant de démarrer le processus incrémental, il suffit de prendre pour valeurs initiales le point défini comme le moment de fissuration (fin du domaine élastique) avec une ouverture de fissure nulle. Les paramètres initiaux sont donc :

$$\begin{aligned} M_b^0 = M_{ext} &= \frac{-bh^2 \cdot \sigma_f^0}{6} & M_f^0 &= 0 \\ N_b^0 &= 0 & N_f^0 &= 0 \end{aligned}$$

Avant d'appliquer l'analyse inverse, les courbes « Contrainte équivalente-ouverture de fissure » sont lissées avec une fonction d'interpolation polynomiale de degré 3 avec un pas constante de 0,01mm. Une correction par rapport à la mesure directe de l'ouverture de fissure est ensuite effectuée afin de prendre en compte la déformation élastique sur la base de mesure. Cette correction s'applique uniquement à la partie de mesure avant la localisation de la fissure (fin de la limite élastique). Pour cela, il suffit de repérer la valeur de l'ouverture de fissure correspond à la perte de linéarité (noté w_0), et de soustraire les valeurs d'ouverture de fissure après la localisation par (w_0). Cette opération consiste à placer la nouvelle origine des courbes au moment de la localisation de la fissure.

La loi (contrainte-ouverture de fissure) est ensuite déterminée par une analyse inverse en prenant en compte l'excentrement du capteur qui mesure l'ouverture de fissure par la relation

(A - 9). En effet, l'excentrement du capteur par rapport au fond de l'entaille induit une surestimation de l'ouverture de fissure.

$$w_{réelle} = w_{mesuré} \frac{\alpha \cdot h - \text{profondeur entaillée}}{\alpha \cdot h + e} \quad (\text{A - 9})$$

Avec e qui correspond à la distance entre capteur et le fond de l'entaille, α la hauteur fissurée, et h la hauteur de l'éprouvette. Cette correction est intégrée au processus itératif de la méthode inverse qui permet d'établir la loi « contrainte-ouverture de fissure ».

Il est également possible de corriger la contrainte post-fissuration obtenues par la méthode inverse, à la fin de chaque itération en effectuant une moyenne mobile, qui permet de repositionner la contrainte de l'itération (i) par rapport à celle de l'itération (i+1) :

$$\sigma_i = \frac{2 \cdot \sigma_i + \sigma_{i+1}}{3} \quad (\text{A - 10})$$