

Norme

NF P18-470

Juillet 2016

1er tirage : -

P18-470

www.afnor.org

**Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances -
Spécification, performance, production et conformité**



**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor

avec l'autorisation de l'Editeur

afnor

norme française

NF P 18-470**29 Juillet 2016**Indice de classement : **P 18-470****ICS : 91.100.30**

Bétons — Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances — Spécification, performance, production et conformité

E : Concrete — Ultra-high performance fibre-reinforced concrete —
Specifications, performance, production and conformity

D : Beton — Faserbewehrte Ultrahochleistungsbetone —
Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR.

Correspondance

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux de normalisation internationaux ou européens traitant du même sujet.

Résumé

Le présent document s'applique aux bétons fibrés à ultra-hautes performances ci-après désignés « BFUP » destinés : aux structures et éléments de structures préfabriqués, aux structures et éléments de structures coulés en place, aux parties d'ouvrages rapportées par coulage en place, en particulier dans le cas de connexions, de revêtements ou de réparations, pour les bâtiments et ouvrages de génie civil.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : béton, fibre, acier, polymère, structure en béton, définition, classification, désignation, spécification, résistance à l'abrasion, consistance, dimension, traitement thermique, résistance à la compression, masse volumique, constituant, composition, choix, ciment, utilisation, granulat, eau, additif, adjuvant pour béton, exposition, durabilité, contrôle de qualité, essai de conformité, essai de compression, essai de flexion, essai de traction, essai d'abrasion.

Modifications

Corrections

La norme

La norme est destinée à servir de base dans les relations entre partenaires économiques, scientifiques, techniques et sociaux.

La norme par nature est d'application volontaire. Référencée dans un contrat, elle s'impose aux parties. Une réglementation peut rendre d'application obligatoire tout ou partie d'une norme.

La norme est un document élaboré par consensus au sein d'un organisme de normalisation par sollicitation des représentants de toutes les parties intéressées. Son adoption est précédée d'une enquête publique.

La norme fait l'objet d'un examen régulier pour évaluer sa pertinence dans le temps.

Toute norme est réputée en vigueur à partir de la date présente sur la première page.

Pour comprendre les normes

L'attention du lecteur est attirée sur les points suivants :

Seules les formes verbales **doit et doivent** sont utilisées pour exprimer une ou des exigences qui doivent être respectées pour se conformer au présent document. Ces exigences peuvent se trouver dans le corps de la norme ou en annexe qualifiée de « normative ». Pour les méthodes d'essai, l'utilisation de l'infinitif correspond à une exigence.

Les expressions telles que, **il convient et il est recommandé** sont utilisées pour exprimer une possibilité préférée mais non exigée pour se conformer au présent document. Les formes verbales **peut et peuvent** sont utilisées pour exprimer une suggestion ou un conseil utiles mais non obligatoires, ou une autorisation.

En outre, le présent document peut fournir des renseignements supplémentaires destinés à faciliter la compréhension ou l'utilisation de certains éléments ou à en clarifier l'application, sans énoncer d'exigence à respecter. Ces éléments sont présentés sous forme de **notes ou d'annexes informatives**.

Commission de normalisation

Une commission de normalisation réunit, dans un domaine d'activité donné, les expertises nécessaires à l'élaboration des normes françaises et des positions françaises sur les projets de norme européenne ou internationale. Elle peut également préparer des normes expérimentales et des fascicules de documentation.

Si vous souhaitez commenter ce texte, faire des propositions d'évolution ou participer à sa révision, adressez-vous à <norminfo@afnor.org>.

La composition de la commission de normalisation qui a élaboré le présent document est donnée ci-après. Lorsqu'un expert représente un organisme différent de son organisme d'appartenance, cette information apparaît sous la forme : organisme d'appartenance (organisme représenté).

Béton**AFNOR P18B**

Composition de la commission de normalisation

Président : M KRETZ

Secrétariat : M HESLING — AFNOR

MME	ARNAUD	CEREMA CENTRE EST
MME	BAROGHEL-BOUNY	IFSTTAR
M	BERNARD	SAINT GOBAIN SEVA
M	BESSE	BETON VICAT (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
M	BODET	UNPG
M	BONNET	BNLH
M	BOULE	EDF CEIDRE
M	BOUTAHIR	BNTEC
MME	BREDY TUFFE	CONDENSIL
M	BRIET	DGALN — DG AMENAGEMENT LOGEMENT NATURE
M	BURDIN	JACQUES BURDIN INGENIEUR CONSEIL
MME	CAPRA	LAFARGE CEMENTS (ATILH)
M	CHAAL	FERROPEM
M	CHEVILLON	AFNOR CERTIFICATION
M	COLLIN	LAFARGE BETONS FRANCE (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
M	CREMOUX	EQUIOM BETONS (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
M	CUSSIGH	VINCI CONSTRUCTION FRANCE (FNTP — FED. NAT. TRAVAUX PUBLICS)
M	DE RIVAZ	AFNOR EXPERTS
M	DEHAUDT	CERIB
MME	DELAIR	GINGER CEBTP
M	DIERKENS	CEREMA CENTRE EST
M	DIVET	IFSTTAR
M	ESTRADE	BETON VICAT (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
MME	FEUILLARD	GINGER CEBTP
M	FONTENY	UNPG
M	FOURMENT	CEMEX FRANCE SERVICES (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
M	FRANCISCO	CERIB
M	GENEREUX	CEREMA DTITM

M	GERMANEAU	CIMENTS CALCIA SAS (ATILH)
M	GODART	IFSTTAR
MME	GOLHEN	SPI — STE PROMOTION INDUSTRIELLE & ENERGETIQUE
M	GONNON	OMYA SAS
M	GUERINET	MICHEL GUERINET (EGF BTP)
M	GUILLOT	LAFARGE (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
M	GUITON	CMF PRODUCTS SAS
M	HAZIME	SURSCHISTE SA
M	HETIER	EDF CEIDRE
M	IZORET	BNLH
M	JEANPIERRE	EDF CEIDRE
M	KRETZ	IFSTTAR
M	LAINE	FIB — FEDERATION DE L'INDUSTRIE DU BETON
MME	LARIVE	CETU — CENTRE D ETUDE DES TUNNELS
M	LAURENCE	OCV CHAMBERY INTERNATIONAL
MME	MAHUT	IFSTTAR
MME	MANSOUTRE	VICAT — LMM (ATILH)
M	MONNANTEUIL	OCV CHAMBERY INTERNATIONAL
M	MUSIKAS	NICOLAS MUSIKAS C/O ECOCEM FRANCE (ECOCEM FRANCE)
M	NAPROUX	SIBELCO FRANCE
MME	NGO BIBINBE	FNTP — FED. NAT. TRAVAUX PUBLICS
M	PICOT	CONDENSIL
M	PILLARD	EGF BTP
M	POTIER	SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI
M	REYNARD	CTPL — CTRE TECH. PROMO. LAITIERS SIDERURGIQUES
M	RIZZO	ECOCEM FRANCE
M	ROBIN	SA COLAS MIDI MEDITERRANEE (ARGECO DEVELOPPEMENT)
M	ROLAND	BEKAERT FRANCE SAS
M	ROUGEAU	CERIB
M	SERRI	UMGO — UNION MACONNERIE GROS OEUVRE
M	TARDY	ARGECO DEVELOPPEMENT
M	THIERRY	EDF CIT
M	TOUTLEMONDE	IFSTTAR
M	TRINH	JACQUES TRINH
M	WAGNER	BNIB
M	WALLER	UNIBETON (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)
M	WOLF	SERSID

Le document a été préparé par les membres du groupe d'experts AFNOR/P18B/GE **BFUP** :
« **Béton ultra-performant armé de fibres** » :

MME	BAROGHEL-BOUNY	IFSTTAR
M	BERNARD	SAINT GOBAIN SEVA
M	BERNARDI	LAFARGE
MME	BREDY TUFFE	CONDENSIL
M	BRUGEAUD	MATIERE (FIB — FEDERATION DE L'INDUSTRIE DU BETON)
MME	CHANUT	EIFFAGE INFRASTRUCTURES GESTION & DEVELOPPEMENT (FNTP — FED. NAT. TRAVAUX PUBLICS)
M	CORVEZ	LAFARGE (ATILH)
M	CUSSIGH	VINCI CONSTRUCTION France (FNTP — FED. NAT. TRAVAUX PUBLICS)
M	DELAVAL	BONNA SABLA SNC (FIB — FEDERATION DE L'INDUSTRIE DU BETON)
M	DELORT	ATILH
M	FONOLLOSA	BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS (FNTP — FED. NAT. TRAVAUX PUBLICS)
M	FRANCISCO	CERIB
M	GERMANEAU	CIMENTS CALCIA SAS (ATILH)
M	GUERINET	MICHEL GUERINET (EGF BTP)
M	HENRI	BONNA SABLA SNC (FIB — FEDERATION DE L'INDUSTRIE DU BETON)
M	HEYRAUD	DELTA PREFABRICATION (FIB — FEDERATION DE L'INDUSTRIE DU BETON)
M	IZORET	BNLH
M	MARCHAND	IFSTTAR
M	MARTIN	SA COLAS MIDI MEDITERRANEE (ARGECON DEVELOPPEMENT)
M	NOWORYTA	CIMENTS CALCIA SAS (ATILH)
M	PILLARD	EGF BTP
M	PIMIENTA	CSTB
M	POTIER	SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI
M	ROGAT	SIGMA BETON
M	ROLAND	BEKAERT FRANCE SAS
M	ROUGEAU	CERIB
MME	SHINK	CENTRE TECHNIQUE GROUPE (SNBPE — SYNDICAT NATIONAL BETON PRET A L'EMPLOI)

NF P 18-470

— 6 —

M	SIMON	EIFFAGE GENIE CIVIL (FNTP — FED. NAT. TRAVAUX PUBLICS)
M	TARDY	ARGEKO DEVELOPPEMENT
M	TOUTLEMONDE	IFSTTAR
M	VUILLEMIN	HOLCIM FRANCE BENELUX
M	WOLF	SERSID

Sommaire

	Page
Avant-propos	11
Introduction	12
1 Domaine d'application	14
2 Références normatives	14
3 Termes, définitions, symboles et abréviations	17
3.1 Termes et définitions repris ou adaptés de la norme NF EN 206/CN:2014	17
3.1.1 Généralités	17
3.1.2 Constituants	19
3.1.3 BFUP Frais	20
3.1.4 BFUP durci	21
3.1.5 Atteinte des performances	21
3.2 Termes et définitions spécifiques du présent document	22
3.2.1 Généralités	22
3.2.2 Atteinte des performances	23
3.3 Symboles et abréviations	23
4 Classification, désignation et codification	25
4.1 Classes associées au type de fibres contribuant à assurer la non-fragilité	25
4.2 Classification en fonction des actions dues à l'environnement	25
4.2.1 Classes d'exposition	25
4.2.2 Classes de résistance aux transferts	30
4.2.3 Classes d'exposition à l'abrasion et classes de résistance à l'abrasion	31
4.3 Classes correspondant aux BFUP frais et en cours de maturation	31
4.3.1 Classes de consistance	31
4.3.2 Classes en fonction de la dimension maximale des granulats	32
4.3.3 Classes de traitement thermique	32
4.4 Classes correspondant aux propriétés des BFUP durcis	33
4.4.1 Classes de résistance à la compression	33
4.4.2 Classes de masse volumique	33
4.4.3 Classes de comportement en traction	34
4.5 Désignation	34
5 Exigences	35
5.1 Exigences relatives aux constituants	35
5.1.1 Généralités	35
5.1.2 Ciments	35
5.1.3 Granulats	36
5.1.4 Eau de gâchage	36
5.1.5 Adjuvants	36
5.1.6 Additions minérales et pigments	36
5.1.7 Fibres contribuant à assurer la non-fragilité	36
5.1.8 Autres fibres apportant des caractéristiques complémentaires	37
5.1.9 Ajouts	37
5.1.10 Cas des pré-mélanges de constituants	37
5.2 Exigences pour la composition des BFUP	38
5.2.1 Généralités	38
5.2.2 Choix du ciment	39
5.2.3 Utilisation des granulats	39
5.2.4 Utilisation des eaux recyclées	40
5.2.5 Utilisation des additions	40
5.2.6 Utilisation d'adjuvants	40

NF P 18-470

5.2.7	Utilisation de fibres contribuant à assurer la non-fragilité.....	40
5.2.8	Utilisation de fibres apportant des caractéristiques complémentaires	41
5.2.9	Utilisation de pré-mélanges de constituants	41
5.2.10	Température du BFUP frais.....	41
5.2.11	Teneur en chlorures.....	41
5.2.12	Protocole de malaxage	42
5.3	Exigences liées aux classes d'exposition (durabilité et abrasion)	42
5.3.1	Généralités.....	42
5.3.2	Exigences pour la composition du BFUP.....	42
5.3.3	Exigences performantielles liées à la durabilité	42
5.3.4	Exigences liées au risque d'abrasion	44
5.4	Exigences pour les BFUP à l'état frais	44
5.4.1	Consistance.....	44
5.4.2	Teneur en air	44
5.4.3	Dimension maximale des granulats	45
5.4.4	Homogénéité du BFUP frais avant mise en œuvre	45
5.4.5	Mise en œuvre du BFUP frais et finition.....	45
5.4.6	Température de mise en œuvre.....	46
5.4.7	Cure	46
5.4.8	Traitements thermiques.....	46
5.5	Exigences pour les BFUP durcis (usage structurel)	48
5.5.1	Généralités.....	48
5.5.2	Résistance en compression	48
5.5.3	Masse volumique.....	48
5.5.4	Comportement en traction	49
5.5.5	Réaction au feu.....	49
5.5.6	Propriétés physiques et mécaniques à haute température.....	50
5.5.7	Maîtrise de l'éclatement sous l'action du feu	51
5.5.8	Module d'Young	51
5.5.9	Déformation à rupture en compression simple.....	51
5.5.10	Retrait.....	51
5.5.11	Fluage	53
5.5.12	Coefficient de dilatation thermique	53
5.6	Carte d'identité	54
5.6.1	Informations associées à la désignation	54
5.6.2	Exigences minimales.....	54
5.6.3	Propriétés complémentaires	55
6	Spécification du BFUP.....	55
6.1	Généralités.....	55
6.2	Spécifications de base.....	56
6.3	Exigences complémentaires.....	56
7	Épreuves d'étude et de convenance	58
7.1	Généralités.....	58
7.2	Épreuve d'étude.....	58
7.2.1	Contenu de l'épreuve d'étude	58
7.2.2	Critères d'acceptation de l'épreuve d'étude.....	59
7.3	Épreuve de convenance	60
7.3.1	Contenu de l'épreuve de convenance.....	60
7.3.2	Critères d'acceptation de l'épreuve de convenance	62
8	Maîtrise de la production des BFUP	63
8.1	Maîtrise de la production et du transport du BFUP frais.....	63
8.2	Maîtrise de la mise en œuvre du BFUP frais.....	64
8.3	Maîtrise de la prise et de la maturation des BFUP	64
9	Contrôle de production et conformité aux exigences	65

9.1	Critères applicables à la production et à la livraison des BFUP à l'état frais.....	65
9.2	Critères applicables aux BFUP durcis	66
9.2.1	Généralités.....	66
9.2.2	Critères d'acceptation des essais de résistance à la compression	67
9.2.3	Critères d'acceptation des essais de comportement en traction	67
10	Évaluation de conformité	67
10.1	Étapes de l'évaluation de conformité d'un BFUP	67
10.2	Tâches et responsabilités	68
Annexe A (normative) Adaptations des modes opératoires pour la détermination des classes de résistance aux transferts		70
A.1	Mesure du coefficient de diffusion des ions chlorures	70
A.2	Mesure de la perméabilité apparente aux gaz	70
A.2.1	Vérification du seuil correspondant au domaine d'application du présent document	70
A.2.2	Vérification du seuil correspondant à la classe Dg+ (voir 4.2.2)	70
Annexe B (normative) Estimation des valeurs caractéristiques		72
Annexe C (normative) Essai de compression et propriétés mécaniques déduites.....		73
C.1	Caractéristiques des éprouvettes	73
C.2	Détermination de la résistance en compression.....	73
C.3	Détermination du module d'Young.....	73
C.4	Détermination du coefficient de Poisson.....	74
Annexe D (normative) Essais de flexion sur prismes et méthode d'exploitation		75
D.1	Introduction	75
D.2	Dimensions et préparation des éprouvettes	75
D.3	Réalisation des essais.....	76
D.4	Exploitation de l'essai de flexion 4 points sur prismes non entaillés.....	78
D.4.1	Détermination de la limite d'élasticité en traction	78
D.4.2	Exploitation dans le cas des BFUP de classe T3	78
D.5	Exploitation des essais de flexion 3 points sur prisme entaillé.....	78
D.5.1	Détermination de l'ouverture de la fissure.....	78
D.5.2	Filtrage des données.....	79
D.5.3	Détermination de la loi post-fissuration en traction par méthode inverse	79
D.6	Correction des effets de bord dus au coulage, au sciage ou à l'entaillage	81
D.6.1	Bords moulés.....	81
D.6.2	Bords sciés	82
D.6.3	Entaille.....	82
D.6.4	Calcul de la correction	82
D.7	Représentation simplifiée	83
Annexe E (normative) Essais de flexion sur plaques minces et méthode d'exploitation		84
E.1	Introduction	84
E.2	Dimensions et préparation des éprouvettes	84
E.3	Réalisation des essais.....	86
E.4	Traitement des données	87
E.4.1	Détermination du comportement élastique.....	87
E.4.2	Méthode inverse point par point à partir de la courbe Moment-flèche	87
E.4.3	Représentation simplifiée	89
Annexe F (normative) Détermination des facteurs d'orientation K à partir des essais de traction par flexion		92
F.1	Introduction	92
F.2	Modalités de détermination	93
Annexe G (normative) Maîtrise de la production des pré-mélanges de constituants		94
Annexe H (informative) Comportement à haute vitesse de sollicitation		96

NF P 18-470

Annexe I (informative) Essai d'abrasion hydraulique	97
I.1 Principe et expression des résultats	97
I.2 Fonctionnement du banc d'essai	98
Bibliographie	99

Avant-propos

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) avait publié en janvier 2002 des recommandations portant sur la conception de structures en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) ainsi que sur les propriétés, la production et le contrôle du BFUP lui-même. Ces recommandations ont été revues pour tenir comptes des retours d'expérience et pour les rendre compatibles avec la norme de conception NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Une édition révisée a été publiée en juin 2013 [1].

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances ont un comportement ductile en flexion, obtenu par l'emploi de fibres suffisamment dosées, permettant de concevoir des structures sans emploi d'armatures de béton armé. En outre, la composition des BFUP, en particulier le fort dosage en liant et un rapport eau/liant typiquement inférieur à 0,25, réduit la porosité capillaire ce qui les rend particulièrement durables vis-à-vis de la carbonatation, de la pénétration des chlorures, de l'action du gel et de nombreuses agressions chimiques.

Les propriétés des BFUP en font des matériaux distincts des bétons à hautes et très hautes performances. Ils ne relèvent donc pas de la norme NF EN 206/CN:2014, l'Eurocode 2 n'est pas suffisant pour concevoir les structures qui les incorporent et la norme NF EN 13670/CN [2] n'est pas adaptée à l'exécution des ouvrages en BFUP. Compte tenu de l'expérience française, de façon coordonnée :

- la Commission de Normalisation AFNOR/P 18B « Béton » a décidé de rédiger le présent document de telle sorte qu'il soit indépendant de la norme NF EN 206/CN:2014 ;
- la Commission de Normalisation BNTRA/CN EC 2 « Calcul des structures en béton » a décidé de rédiger une norme de conception des structures en BFUP NF P 18-710:2016 *Calcul des structures en béton – Règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)*, qui constitue un complément national à l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA) ;
- la Commission de Normalisation BNTEC P 18E « Exécution des ouvrages en béton » a décidé de rédiger une norme d'exécution des structures en BFUP NF P 18-451 *Exécution des structures en béton – Règles spécifiques pour les BFUP*, qui complète et adapte la norme NF EN 13670/CN [2].

Ces trois documents fondés sur le contenu des recommandations de l'AFGC, sont publiés avec le statut de norme française homologuée et ont vocation à servir de base pour la rédaction de normes européennes de mêmes domaines d'application.

Des BFUP de composition dérogeant au présent document par leur composition ou par l'emploi de constituants non prévus, peuvent également satisfaire aux objectifs performantiels du présent document caractérisant les BFUP, en particulier la non-fragilité, la résistance et la haute durabilité. Ces BFUP innovants ne sont pas couverts par le présent document mais relèvent de procédures d'évaluations techniques et, en particulier, d'ATEX.

NF P 18-470

Introduction

Les recommandations de l'AFGC sur les bétons fibrés à ultra-hautes performances [1] ne concernent que des BFUP destinés à des applications structurelles. Compte tenu de l'expérience française, ces BFUP ont une résistance à la compression d'au moins 150 MPa, exprimée en termes de résistance caractéristique, et leur non-fragilité résulte de l'emploi exclusif de fibres d'acier même si d'autres fibres peuvent être également incorporées pour obtenir une performance particulière, par exemple les fibres de polypropylène pour améliorer la résistance au feu.

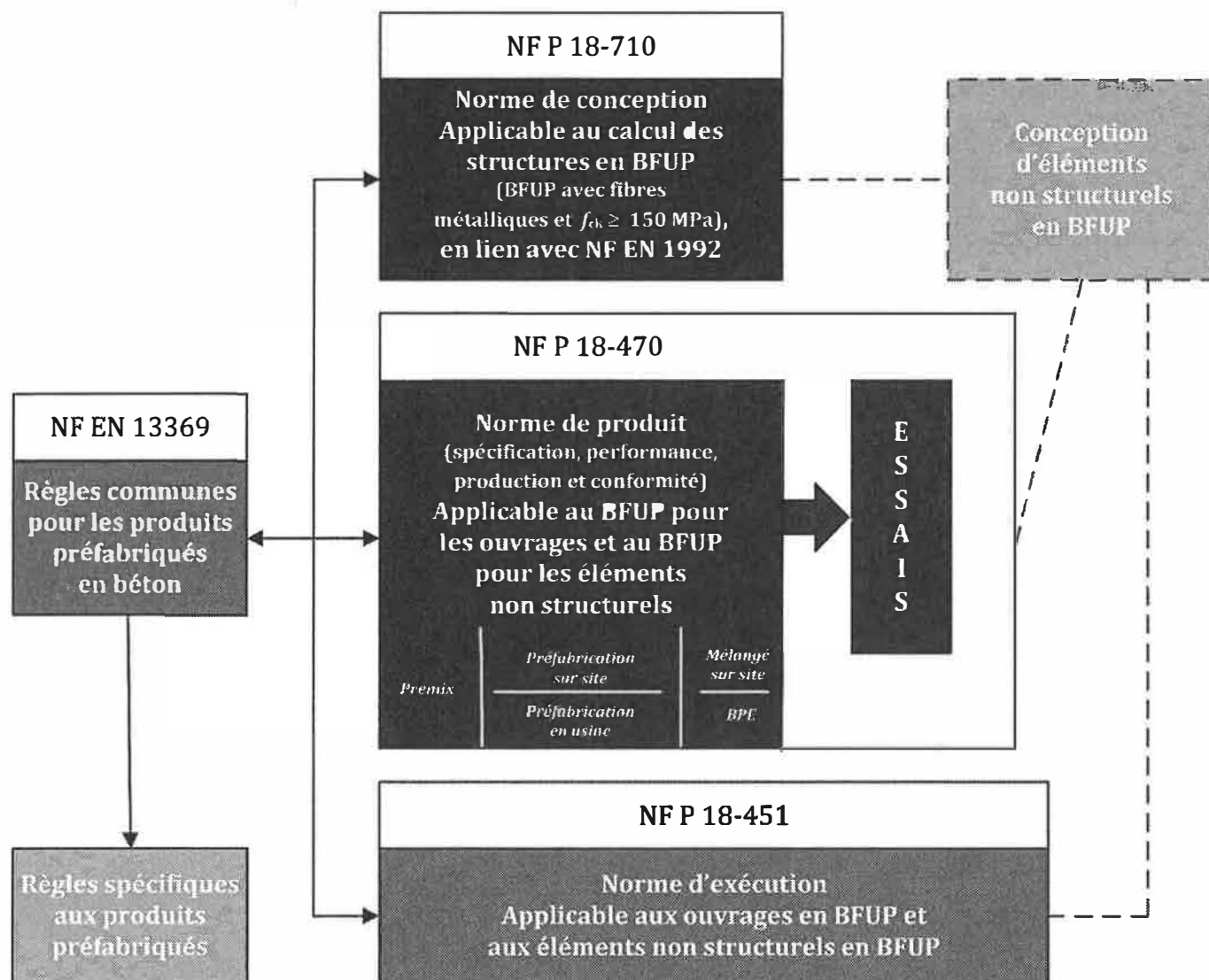
Le présent document identifie donc des BFUP de classes 150/165 et plus, et contenant des fibres d'acier, auxquels la norme de conception NF P 18-710:2016 fait référence. Il couvre également des BFUP contenant d'autres types de fibres ou des BFUP de résistance inférieure (130 MPa), auxquels la norme NF P 18-710:2016 ne fait pas référence. Ces BFUP peuvent être utilisés dans des ouvrages non structuraux ou architectoniques. Ils peuvent également faire l'objet d'applications structurelles, à condition que celles-ci soient couvertes par une procédure d'évaluation technique appropriée à des réalisations non traditionnelles.

La Figure 1 présente l'architecture des normes en distinguant :

- d'une part :
 - le présent document qui couvre et classe les BFUP sans préjuger de leur domaine d'utilisation ;
 - la norme NF P 18-710:2016 qui fournit les règles de conception des structures en BFUP ;
 - la norme NF P 18-451¹⁾ qui fournit les dispositions à mettre en œuvre pour l'exécution des structures en BFUP ;
- d'autre part, les règles communes NF EN 13369:2013 et les normes de produits s'appliquant à des produits préfabriqués en BFUP ;
- et, enfin, des documents à prévoir et de statut à préciser destinés à couvrir la conception et l'exécution des éléments non structuraux en BFUP.

1) En cours de préparation à la date de publication du présent document.

NF P 18-470



Légende



Normes parues en 2016



Norme ou révision de norme à paraître fin 2016 ou en 2017



Règles ne faisant pas l'objet de normes couvrant les BFUP à la date de publication du présent document

Figure 1 — Normalisation française des BFUP - Architecture des normes

NF P 18-470

1 Domaine d'application

Le présent document s'applique aux bétons fibrés à ultra-hautes performances ci-après désignés « BFUP » destinés :

- aux structures et éléments de structures préfabriqués ;
- aux structures et éléments de structures coulés en place ;
- aux parties d'ouvrages rapportées par coulage en place, en particulier dans le cas de connexions, de revêtements ou de réparations ;

pour les bâtiments et ouvrages de génie civil.

Il s'applique également aux éléments non-structuraux ou architectoniques préfabriqués, ou le cas échéant, coulés en place.

Les BFUP couverts par le présent document sont fabriqués et mis en œuvre conformément à la norme NF P 18-451. Ils peuvent être fabriqués sur chantier ou dans une centrale de béton prêt à l'emploi ou encore dans une usine de production de produits préfabriqués. Le présent document ne traite pas des spécifications relatives aux BFUP destinés à être mis en place par projection.

Le présent document spécifie les exigences applicables :

- aux constituants des BFUP ;
- aux pré-mélanges de constituants, le cas échéant ;
- aux BFUP frais et durcis et à la vérification de leurs propriétés ;
- à la composition des BFUP ;
- à la spécification des BFUP ;
- à la livraison, à la mise en place et à la cure du BFUP frais ;
- au traitement thermique nécessaire à l'obtention des performances, le cas échéant ;
- aux épreuves d'étude ou à la carte d'identité du BFUP ;
- aux essais de convenance à réaliser avant la mise en production d'un BFUP donné ;
- aux procédures de contrôle de production ;
- aux critères de conformité et à l'évaluation de conformité du BFUP.

Le présent document est destiné à être appliqué dans des conditions de production couvertes, pour chacun des différents acteurs concernés, par un système d'assurance de la qualité couvrant la production du BFUP et la formation correspondante du personnel.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

NF P 15-317, *Liants hydrauliques — Ciments pour travaux à la mer.*

NF P 18-470

NF P 15-318, *Liants hydrauliques — Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.*

FD P 18-011, *Bétons — Classification des environnements agressifs²⁾.*

FD P 18-326, *Béton — Zones de gel en France.*

NF P 18-451, *Exécution des structures en béton — Règles spécifiques pour les BFUP³⁾.*

NF P 18-459, *Béton — Essai pour béton durci — Essai de porosité et de masse volumique.*

XP P 18-462, *Essai sur béton durci — Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire – Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure.*

XP P 18-463:2011, *Bétons — Essai de perméabilité aux gaz sur béton durci.*

FD P 18-464, *Béton — Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction.*

FD P 18-503, *Surfaces et parements de béton — Éléments d'identification.*

NF P 18-508, *Additions pour béton hydraulique — Additions calcaires — Spécifications et critères de conformité.*

NF P 18-509, *Additions pour béton hydraulique — Additions siliceuses — Spécifications et critères de conformité.*

NF P 18-513, *Addition pour béton hydraulique — Métakaolin — Spécifications et critères de conformité.*

FD P 18-542, *Granulats — Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.*

NF P 18-545, *Granulats — Éléments de définition, conformité et codification.*

NF P 18-710:2016, *Complément national à l'Eurocode 2 — Calcul des structures en béton — Règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP).*

NF EN 196-1, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques (indice de classement : P 15-471-1).*

NF EN 196-2, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 2 : Analyse chimique des ciments (indice de classement : P 15-471-2).*

NF EN 197-1, *Ciment — Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (indice de classement : P 15-101-1).*

NF EN 206/CN:2014, *Béton — Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la norme NF EN 206.*

NF EN 450-1, *Cendres volantes pour béton — Partie 1 : Définition, spécifications et critères de conformité (indice de classement : P 18-050-1).*

NF EN 933-1, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats — Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage (indice de classement : P 18-622-1).*

2) En cours de révision à la date de publication du présent document.

3) En cours de préparation à la date de publication du présent document.

NF P 18-470

NF EN 934-2+A1, *Adjuvants pour béton, mortier et coulis — Partie 2 : Adjuvants pour bétons — Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage (indice de classement : P 18-341-2).*

NF EN 1008, *Eau de gâchage pour bétons — Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement : P 18-211).*

NF EN 1770, *Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Méthodes d'essais — Détermination du coefficient de dilatation thermique (indice de classement : P 18-939).*

NF EN 1990, *Eurocodes structuraux — Bases de calcul des structures (indice de classement : P 06-100-1).*

NF EN 1992-1-1, *Eurocode 2 — Calcul des structures en béton — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (indice de classement : P 18-711-1).*

NF EN 1992-1-1/NA, *Eurocode 2 — Calcul des structures en béton — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments — Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1:2005 — Règles générales et règles pour les bâtiments (indice de classement : P 18-711-1/NA).*

NF EN 1992-1-2, *Eurocode 2 — Calcul des structures en béton — Partie 1-2 : Règles générales — Calcul du comportement au feu (indice de classement : P 18-712-1).*

NF EN 1992-1-2/NA:2007, *Eurocode 2 — Calcul des structures en béton — Partie 1-2 : Règles générales — Calcul du comportement au feu — Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-2:2005 — Calcul du comportement au feu (indice de classement : P 18-712-1/NA).*

NF EN 1992-2:2006, *Eurocode 2 — Calcul des structures en béton — Partie 2 : Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives (indice de classement : P 18-720-1).*

NF EN 12350-5, *Essais pour béton frais — Partie 5 : Essai d'étalement à la table à choc (indice de classement : P 18-431-5).*

NF EN 12350-7, *Essais pour béton frais — Partie 7 : Teneur en air — Méthode de la compressibilité (indice de classement : P 18-431-7).*

NF EN 12350-8, *Essai pour béton frais — Partie 8 : Béton auto-plaçant — Essai d'étalement au cône d'Abrams (indice de classement : P 18-431-8).*

NF EN 12390-1, *Essais pour béton durci — Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules (indice de classement : P 18-430-1).*

NF EN 12390-2, *Essais pour béton durci — Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance (indice de classement : P 18-430-2).*

NF EN 12390-3:2012, *Essais pour béton durci — Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes (indice de classement : P 18-430-3).*

NF EN 12390-7, *Essais pour béton durci — Partie 7 : Masse volumique du béton durci (indice de classement : P 18-430-7).*

NF EN 12390-13:2014, *Essai pour béton durci — Partie 13 : Détermination du module sécant d'élasticité en compression (indice de classement : P 18-430-13).*

NF EN 12620+A1, *Granulats pour béton (indice de classement : P 18-601).*

NF EN 12878, *Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux — spécifications et méthodes d'essai (indice de classement : T 31-209).*

NF P 18-470

NF EN 13263-1+A1, *Fumée de silice pour béton — Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité (indice de classement : P 18-502-1).*

NF EN 13369:2013, *Règles communes pour les produits préfabriqués en béton (indice de classement : P 19-800).*

NF EN 13501-1+A1, *Classement au feu des produits et éléments de construction — Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu (indice de classement : P 92-800-1).*

NF EN 13577, *Attaque chimique du béton — Détermination de la teneur en dioxyde de carbone agressif de l'eau (indice de classement : P 18-449).*

NF EN 14889-1, *Fibres pour béton — Partie 1 : Fibres d'acier — Définitions, spécifications et conformité (indice de classement : P 18-328-1).*

NF EN 14889-2, *Fibres pour béton — Partie 2 : Fibres de polymère — Définition, spécifications et conformité (indice de classement : P 18-328-2).*

NF EN 15167-1, *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis — Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité (indice de classement : P 18-512-1).*

NF EN 16502, *Méthode d'essai pour la détermination du degré d'acidité des sols selon Baumann-Gully (indice de classement : P 18-465).*

ISO 4316, *Agents de surface — Détermination du pH des solutions aqueuses — Méthode potentiométrique.*

ISO 7150-2, *Qualité de l'eau — Dosage de l'ammonium — Partie 2 : Méthode spectrométrique automatique.*

NF EN ISO 7980, *Qualité de l'eau — Dosage du calcium et du magnésium — Méthode par spectrométrie d'absorption atomique (indice de classement : T 90-005).*

ASTM C230/C230M, *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.*

3 Termes, définitions, symboles et abréviations

3.1 Termes et définitions repris ou adaptés de la norme NF EN 206/CN:2014

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1.1 Généralités

3.1.1.1

béton

matériau formé par mélange de ciment, de sable, de gravillons et d'eau, et éventuellement d'adjuvants, d'additions ou de fibres, et dont les propriétés se développent par hydratation

Note 1 à l'article Les bétons couverts par le présent document sont exclusivement des bétons fibrés à ultra-hautes performances, tels que définis en 3.2.1 dans la norme NF P 18-470, et ne comportent pas nécessairement de gravillons.

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.1 modifié – Ajout de la note]

3.1.1.2

livraison

action de remise du BFUP frais par le producteur

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.3 modifié – remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

NF P 18-470

3.1.1.3

BFUP à propriétés spécifiées

BFUP pour lequel les propriétés requises et les éventuelles caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur, qui a la responsabilité de fournir un BFUP qui satisfait à ces propriétés requises et à ces caractéristiques supplémentaires

Note 1 à l'article Un BFUP est toujours un BFUP à propriétés spécifiées ; il ne peut être un béton à composition prescrite (BCP) au sens du 3.1.1.10 de la norme NF EN 206/CN:2014 car le respect de la composition n'est pas suffisant pour assurer l'atteinte des performances.

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.4 modifié – remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition et ajout de la note]

3.1.1.4

durée d'utilisation prévue au projet

période présumée pendant laquelle une structure ou l'un de ses éléments est destiné(e) à être employé(e) conformément à son utilisation prévue, sous condition de maintenance prévue, mais sans que des réparations majeures soient nécessaires

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.5]

3.1.1.5

actions dues à l'environnement

actions physiques et chimiques auxquelles le BFUP est exposé, qui entraînent des effets sur le BFUP, ses constituants, les armatures ou les inserts métalliques, et qui ne sont pas considérées comme des charges pour la conception de la structure

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.7 modifié – Remplacement de « béton » par « BFUP » - Ajout de « ses constituants, » dans la définition]

3.1.1.6

élément préfabriqué

élément en BFUP dont le coulage et la cure sont effectués dans un lieu différent de celui où il sera utilisé (production en usine ou sur site)

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.8 modifié – Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.1.7

producteur

personne physique ou morale produisant du BFUP frais

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.11 modifié – Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.1.8

BFUP prêt à l'emploi

BFUP livré à l'état frais à l'utilisateur par une personne physique ou morale qui n'est pas l'utilisateur. Au sens du présent document, il s'agit également :

- du BFUP produit par l'utilisateur hors du chantier ;
- du BFUP produit sur le chantier, mais pas par l'utilisateur

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.13 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.1.9**BFUP de chantier**

BFUP produit sur le chantier de construction par l'utilisateur du BFUP pour son propre usage

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.15 modifié – Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.1.10**chantier (chantier de construction)**

lieu où le travail de construction est réalisé

3.1.1.11**spécification du BFUP**

compilation finale des exigences techniques documentées transmises au producteur en termes de performances, résultant éventuellement de plusieurs prescriptions complémentaires provenant de plusieurs prescripteurs

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.1.17 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans le titre]

3.1.1.12**prescripteur**

personne physique ou morale qui établit la spécification du BFUP frais et durci.

Note 1 à l'article Le prescripteur peut être l'un ou plusieurs des intervenants suivants : maître d'œuvre, maître d'ouvrage, entrepreneur ou préfabricant, selon les modalités du marché.

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.1 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.2 Constituants**3.1.2.1****addition**

constituant minéral finement divisé utilisé dans le BFUP afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.1 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.2.2**adjuvant**

constituant ajouté au BFUP durant le processus de malaxage, en petites quantités par rapport à la masse de ciment, afin de modifier les propriétés du BFUP frais ou durci

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.4 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.2.3**granulat**

constituant minéral granulaire naturel, artificiel, récupéré ou recyclé, apte à être utilisé dans du BFUP

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.5 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.2.4**ciment**

matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.8]

NF P 18-470

3.1.2.5

fibres polymère

éléments droits ou déformés de produit organique extrudé, orienté et coupé, qui conviennent pour être mélangés de manière homogène dans le BFUP

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.13 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.2.6

fibres d'acier

éléments droits ou déformés provenant de fil étiré à froid, de tôle découpée, d'extraits de coulée, de fil étiré à froid raboté ou de blocs d'acier fraisés. Les fibres doivent pouvoir être mélangées de manière homogène dans le BFUP.

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.17 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.2.7

ajouts

tous les produits qui sont incorporés au BFUP autres que le ciment, les granulats, l'eau de gâchage, les adjuvants, les additions minérales, les pigments ou les fibres (par exemple, produit augmentant la viscosité ou la thixotropie du BFUP autre qu'un adjuvant)

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.2.18 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » et reformulation de la définition]

3.1.3 BFUP Frais

3.1.3.1

cuve agitatrice

équipement habituellement monté sur un châssis autotracté et capable de conserver un BFUP frais homogène pendant le transport

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.1 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.3.2

gâchée

quantité de BFUP frais produite en un seul cycle par un malaxeur discontinu

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.2 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition – Suppression de « , ou quantité déversée pendant 1 min par un malaxeur continu »]

3.1.3.3

mètre cube de BFUP

quantité de BFUP frais qui, une fois mise en place conformément au présent document, occupe un volume d'1 m³

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.3 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.3.4

air occlus

vides d'air dans le BFUP, qui ne sont pas générés intentionnellement

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.6 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.3.5

BFUP frais

BFUP entièrement mélangé et encore dans un état permettant de le mettre en place avec la méthode choisie

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.7 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans le titre et dans la définition]

3.1.3.6

charge

quantité de BFUP transportée en une fois et comprenant une gâchée, une fraction de gâchée ou plusieurs gâchées

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.8 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP », de « dans un véhicule » par « en une fois » et de « une ou plusieurs gâchées » par « une gâchée, une fraction de gâchée ou plusieurs gâchées » dans la définition]

3.1.3.7

cuve non agitatrice

équipement utilisé pour le transport du BFUP sans agitateur (3.1.3.1)

EXEMPLE Une trémie de transport

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.9 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.3.8

résistance à la ségrégation

capacité du BFUP frais à conserver une composition homogène

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.3.11 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.4 BFUP durci

3.1.4.1

BFUP durci

BFUP à l'état solide ayant acquis une résistance notable

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.4.2 modifié - Remplacement de « béton » par « BFUP » dans la définition]

3.1.4.2

résistance caractéristique

valeur de résistance au-dessus de laquelle il est probable que se situent 95 % des résultats de toutes les mesures de résistance possibles effectuées pour le volume de BFUP considéré

Note 1 à l'article Dans la norme NF P 18-470, la résistance caractéristique est estimée à partir d'un échantillon de valeurs expérimentales, en supposant une distribution normale.

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.5.4 modifié - Reformulation de la définition pour le BFUP]

3.1.5 Atteinte des performances

3.1.5.1

essai de conformité

essai effectué par le producteur ou l'utilisateur du BFUP frais, selon les dispositions de la norme NF P 18-470, pour évaluer la conformité du BFUP dans le cadre d'une épreuve de convenance (3.2.2.5) ou pendant une période de production

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.5.6 modifié - Reformulation de la définition pour le BFUP]

NF P 18-470

3.1.5.2

évaluation de conformité

évaluation des résultats d'analyses et d'essais obtenus sur un BFUP dans le cadre d'une épreuve de convenance ou pendant une période de production ou une fraction de la période de production (période de contrôle) destinée à vérifier la conformité d'un BFUP à la norme NF P 18-470, en fonction des spécifications du marché

[SOURCE : NF EN 206/CN:2014, 3.1.5.7 modifié – Reformulation de la définition pour le BFUP]

3.2 Termes et définitions spécifiques du présent document

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.2.1 Généralités

3.2.1.1

béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP)

béton caractérisé par une résistance à la compression élevée, supérieure à 130 MPa, au-delà du domaine d'application de la norme NF EN 206/CN:2014, par une résistance en traction post-fissuration importante permettant d'obtenir un comportement ductile en traction et dont la non-fragilité permet de calculer et de réaliser des structures et éléments de structure sans utiliser d'armatures de béton armé

Note 1 à l'article Pour la réalisation de certaines structures, le BFUP peut néanmoins contenir des armatures de béton armé (on parle alors de BFUP armé) ou des armatures de précontrainte (BFUP précontraint).

3.2.1.2

liant

au sens du présent document, ensemble des constituants à l'exception des fibres, du sable, des éventuels gravillons et des éventuels pigments

3.2.1.3

pré-mélange de constituants

mélange homogène de constituants, de composition déterminée et constante, réalisé en usine, destiné à la production de BFUP, et mis sur le marché accompagné d'une carte d'identité (voir 3.2.2.1)

Note 1 à l'article Les pré-mélanges de constituants sont usuellement appelés « premix ».

3.2.1.4

eau totale

somme de l'eau d'apport, y compris sous forme de glace, de l'eau déjà contenue dans et à la surface des granulats, de l'eau des adjuvants, de l'eau des ajouts et des additions utilisés sous la forme de suspensions, figurant dans la composition nominale du BFUP (5.2.1)

3.2.1.5

durée pratique d'utilisation

durée spécifiée, comptée à partir de l'introduction de l'eau lors du gâchage, au cours de laquelle le BFUP conserve l'ouvrabilité requise

3.2.1.6

âge équivalent

âge du BFUP correspondant au temps durant lequel le BFUP doit être maintenu à la température de référence de 20 °C afin d'obtenir la même valeur de maturité (caractérisée par sa résistance en compression) que dans les conditions de cure et d'histoire thermique réelles.

3.2.1.7

élément mince

élément dont l'épaisseur est inférieure ou égale à trois fois la longueur des plus longues fibres contribuant à assurer la non-fragilité

3.2.2 Atteinte des performances

3.2.2.1

carte d'identité

document associé à une composition nominale de BFUP, à son principe de fabrication et aux traitements pouvant suivre sa mise en œuvre, indiquant l'ensemble des caractéristiques du matériau sur lesquelles le producteur s'engage, en termes de performances atteintes par le BFUP lorsque les dispositions données dans la carte d'identité sont rigoureusement appliquées.

Note 1 à l'article Disponible avant l'épreuve de convenance du projet, la carte d'identité, si elle existe, se substitue en tout ou partie aux résultats d'épreuves d'étude. Elle permet de présumer favorablement de l'atteinte par le matériau des exigences spécifiées au projet et de gagner du temps sur les études détaillées.

Note 2 à l'article Les BFUP obtenus à partir d'un pré-mélange de constituants disposent d'une carte d'identité.

3.2.2.2

producteur de pré-mélange

personne physique ou morale produisant un pré-mélange de constituants (3.2.1.2) destiné à être mis sur le marché accompagné d'une carte d'identité (3.2.2.1)

3.2.2.3

utilisateur

personne physique ou morale utilisant du BFUP frais, le mettant en place et lui appliquant les éventuels traitements ultérieurs nécessaires à l'obtention des performances spécifiées, pour l'exécution d'une construction ou d'un élément

3.2.2.4

épreuve d'étude

procédure mise en œuvre par le producteur de BFUP comprenant les analyses et essais permettant de démontrer l'aptitude d'une formulation de BFUP à respecter les exigences du présent document et celles de la spécification du produit, de la structure ou de l'élément de structure objet d'un marché donné

Note 1 à l'article L'épreuve d'étude s'appuie, le cas échéant, sur une carte d'identité du BFUP (3.2.2.1).

3.2.2.5

épreuve de convenance

procédure mise en œuvre par le producteur et l'utilisateur de BFUP comprenant les analyses et essais, y compris sur élément témoin, destinée à démontrer la conformité d'un BFUP au présent document et aux spécifications du marché dans les conditions d'exécution du projet, du produit ou du composant d'ouvrage, avec validation de l'incidence de la mise en œuvre.

3.3 Symboles et abréviations

X0	Classe d'exposition pour l'absence de risque de corrosion ou d'attaque
XC1 à XC4	Classes d'exposition pour le risque de corrosion par carbonatation
XD1 à XD3	Classes d'exposition pour le risque de corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer
XS1 à XS3	Classes d'exposition pour le risque de corrosion par les chlorures de l'eau de mer
XF1 à XF4	Classes d'exposition pour le risque d'attaque par le gel-dégel
XA1 à XA3	Classes d'exposition pour le risque d'attaque chimique
XH1 à XH3	Classes associées à la prévention des risques dus à la formation différée d'ettringite

NF P 18-470

D_{p+}	Classe de porosité améliorée définie en 4.2.2
D_{c+}	Classe correspondant à une résistance améliorée à la diffusion des ions chlorure définie en 4.2.2
D_{g+}	Classes correspondant à une résistance améliorée aux transferts gazeux définie en 4.2.2
XM1 à XM3	Classes d'exposition à l'abrasion
RM1 à RM3	Classes de résistance à l'abrasion associée à des écoulements hydrauliques définies en 4.2.3
Ca, Cv, Ct	Classes de consistance définies en 4.3.1
D_{sup}	Plus grande valeur de D pour les plus gros granulats effectivement utilisés dans le BFUP (présents dans le BFUP et autorisés par la spécification du BFUP), D étant la dimension supérieure au tamis d'un granulat classé selon d/D (NF EN 12620+A1) NOTE Par souci de simplicité, dans le présent document, on appelle D_{sup} la dimension nominale supérieure du plus gros granulat
STT, TT1, TT2, TT1+2	Classes de traitement thermique définies en 4.3.3
BFUP.../...	Classes de résistance à la compression pour les BFUP définies en 4.4.1, le premier nombre correspondant à $f_{ck,cyl}$ et le second à $f_{ck,cube}$
T1, T2, T3	Classes de comportement en traction définies en 4.4.3
L_f	Longueur des plus longues fibres contribuant à assurer la non fragilité
f_{ck}	Résistance caractéristique à la compression du BFUP NOTE Lorsque ce symbole est utilisé dans le présent document, il s'applique selon le cas à $f_{ck,cyl}$ ou à $f_{ck,cube}$
$f_{ck,cyl}$	Résistance caractéristique à la compression du BFUP déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques
$f_{ck,req}$	Valeur caractéristique requise de la résistance à la compression
$f_{c,cyl}$	Résistance à la compression du BFUP déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques
$f_{ck,cube}$	Résistance caractéristique à la compression du BFUP déterminée par essais sur éprouvettes cubiques
$f_{c,cube}$	Résistance à la compression du BFUP déterminée par essais sur éprouvettes cubiques
f_{cm}	Résistance moyenne à la compression du BFUP NOTE Lorsque ce symbole est utilisé dans le présent document, il s'applique selon le cas à $f_{cm,cyl}$ ou à $f_{cm,cube}$
f_{ci}	Résultat d'essai individuel de résistance à la compression du béton
$f_{ctm,el}$	Valeur moyenne de la limite d'élasticité en traction
$f_{ctk,el}$	Valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction
$f_{ctk,el,req}$	Valeur caractéristique requise de la limite d'élasticité en traction
$f_{cti,el}$	Résultat individuel de limite d'élasticité en traction
$M_{max,i}$	Résultat individuel de moment fléchissant maximum lors d'une caractérisation par essai de flexion
$M_{m,max}$	Valeur moyenne du moment fléchissant maximum lors d'une caractérisation par essai de flexion
M_{ref}	Valeur du moment fléchissant maximum calculé avec la courbe de réponse en traction spécifiée
f_{ctf}	Résistance en traction post-fissuration
f_{ctfm}	Valeur moyenne de la résistance post-fissuration
f_{ctfk}	Valeur caractéristique de la résistance post-fissuration
f_{ctf}^*	Contrainte limite post-fissuration selon la loi simplifiée
ϵ_{el}	Limite de déformation élastique en traction
ϵ_{lim}	Limite de déformation en traction prise en compte dans la réponse

S_c	Écart-type
ϕ	Diamètre du cylindre d'essai
K	Facteur d'orientation traduisant l'effet mécanique de l'orientation des fibres sur le comportement post-fissuration en traction
K_{global}	Facteur d'orientation associé aux effets globaux
K_{local}	Facteur d'orientation associé aux effets locaux
γ_{cf}	Coefficient partiel relatif au BFUP tendu
γ_c	Coefficient partiel relatif au BFUP comprimé
E_{cm}	Valeur moyenne du module d'Young
E	Module d'élasticité en flexion défini en E.4.1

4 Classification, désignation et codification

4.1 Classes associées au type de fibres contribuant à assurer la non-fragilité

Le BFUP est classé selon la nature des fibres qui contribuent à assurer le caractère écrouissant en flexion au sens de 4.4.3.

Le BFUP est dit de type M (métallique) lorsqu'il s'agit de fibres métalliques.

Le BFUP est dit de type A (autre) lorsqu'il s'agit d'autres fibres, en particulier de fibres organiques.

4.2 Classification en fonction des actions dues à l'environnement

4.2.1 Classes d'exposition

4.2.1.1 Généralités

Les actions dues à l'environnement sont réparties par classes d'exposition conformément au Tableau 1, issu de la norme NF EN 206/CN:2014. Les exemples sont donnés à titre informatif.

Les classes d'exposition explicitées ci-après conduisent à des prescriptions concernant l'enrobage et la maîtrise de la fissuration détaillées dans la norme NF P 18-710:2016, qui complète la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA pour une application aux structures en BFUP, et à des spécifications sur le matériau BFUP détaillées en 5.3.

NF P 18-470

Tableau 1 — Classes d'exposition en fonction de l'environnement

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
1 Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
X0	Pour le béton non armé ou sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf l'abrasion, l'attaque chimique ou par le gel-dégel Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible
2 Corrosion par carbonatation		
Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les classes d'exposition doivent être définies comme suit :		
XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ; béton immergé dans l'eau en permanence
XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact de l'eau à long terme Grand nombre de fondations
XC3	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé Béton extérieur abrité de la pluie
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2
3 Corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer		
Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau contenant des chlorures d'origine autre que marine, y compris ceux des sels de déverglaçage, les classes d'exposition doivent être définies comme suit :		
XD1	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne
XD2	Humide, rarement sec	Piscines Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures
XD3	Alternance d'humidité et de séchage	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées ; dalles de parcs de stationnement de véhicules
4 Corrosion par les chlorures de l'eau de mer		
Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures de l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les classes d'exposition doivent être définies comme suit :		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte
XS2	Immergé en permanence	Éléments de structures marines
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	Éléments de structures marines
5 Attaque par le gel-dégel avec ou sans agent de déverglaçage		
Lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel-dégel alors qu'il est mouillé, les classes d'exposition doivent être définies comme suit :		
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons exposées à la pluie et au gel
XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage
XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces horizontales de bétons exposées à la pluie et au gel
XF4	Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage ou eau de mer	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage Surfaces de bétons directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel
6 Attaque chimique		
Lorsque le béton est soumis à une attaque chimique par les sols et les eaux souterraines naturels, les classes d'exposition doivent être définies comme suit :		
XA1	Environnement à faible agressivité chimique	Béton exposé à des sols et des eaux souterraines naturels selon le Tableau 3
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	Béton exposé à des sols et des eaux souterraines naturels selon le Tableau 3
XA3	Environnement à forte agressivité chimique	Béton exposé à des sols et des eaux souterraines naturels selon le Tableau 3

NF P 18-470

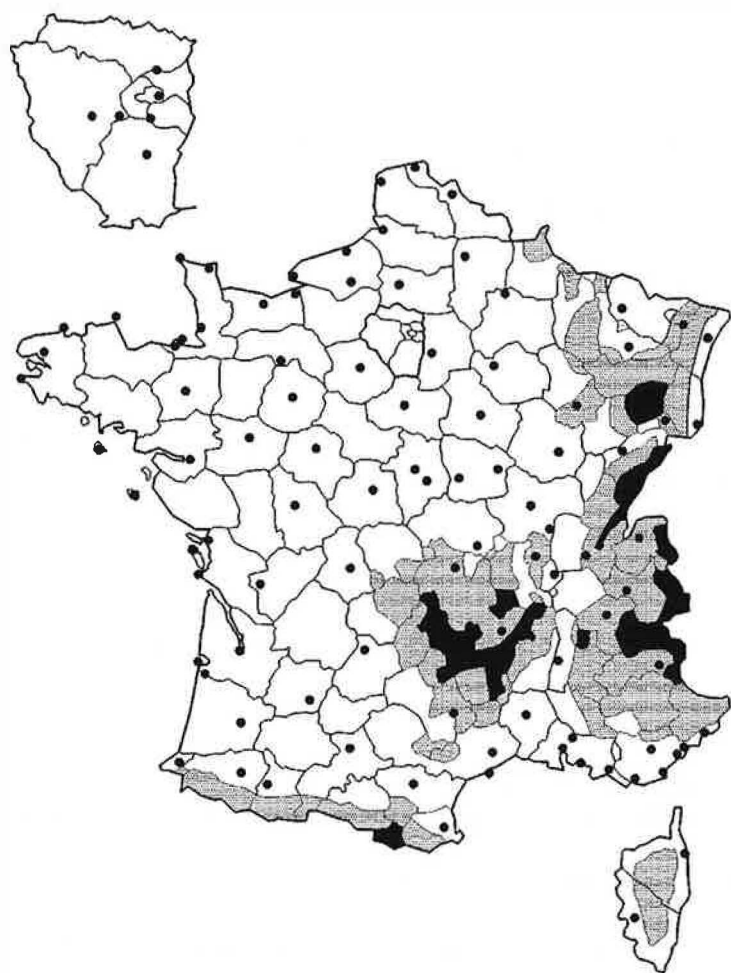
Les précisions suivantes sont apportées :

- a) les BFUP de type M ne peuvent pas relever de la classe d'exposition X0 ;
- b) en l'absence de spécifications particulières, sont à classer :
 - 1) en XC1 : les parties de bâtiments à l'abri de la pluie, à l'exception des parties classées en XC3 ;
 - 2) en XC2 : les parties de bâtiments en contact de l'eau à long terme ;
 - 3) en XC3 : les parties de bâtiment à l'abri de la pluie mais non closes, ou exposées à des condensations importantes à la fois par leur fréquence et leur durée ;
 - 4) en XC4 : les parties aériennes d'ouvrages d'art et les parties aériennes des bâtiments non protégées de la pluie, y compris les retours de ces parties concernés par les cheminements et/ou rejaillissements d'eau ;
- c) en l'absence de spécifications particulières, sont à classer :
 - 1) en XD1 : les surfaces modérément humides exposées à des chlorures transportés par voie aérienne ;
 - 2) en XD2 : les piscines ou les parties exposées aux eaux industrielles et contenant des chlorures ;
 - 3) en XD3 : les parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures, et sous réserve d'absence de revêtement d'étanchéité assurant la protection du BFUP ;
- d) en l'absence de spécifications particulières, sont à classer :
 - 1) en XS1 : les éléments de structures qui ne sont ni en contact avec l'eau de mer ni exposés aux embruns, mais qui sont directement exposés à l'air salin, soit ceux qui se situent au-delà de la zone de classement XS3 et à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, suivant la topographie particulière ;
 - 2) en XS2 : les éléments de structures marines immergés en permanence ;
 - 3) en XS3 : les éléments de structures marines en zone de marnage et/ou exposés aux embruns, lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière ;
- e) dans le cas d'attaque gel-dégel et sauf spécification particulière notamment fondée sur l'état de saturation par contact durable avec l'eau liquide (par exemple surface horizontale ou non), les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4 sont indiquées dans la carte donnant les zones de gel (Figure 2) et dans le Tableau 2, avec les précisions du fascicule de documentation FD P 18-326. Le salage est considéré comme « peu fréquent » lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, « très fréquent » lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30 et « fréquent » entre ces deux cas.





Tableau 2 — Classes d'exposition au gel-dégel avec ou sans agent de déverglaçage

Gel \ Salage	Aucun	Peu fréquent	Fréquent	Très fréquent
Faible ou modéré	XF1	XF1	XF2	XF2 ^a
Sévère	XF3	XF3	XF4	XF4
^a À l'exception des chaussées béton et des éléments d'ouvrages d'art très exposés qui seront classés en XF4.				

NF P 18-470



Légende

	Gel faible ou modéré :	{	XF1 (sans agent de déverglaçage) ¹⁾
			XF2 (avec agent de déverglaçage) ²⁾
	Gel sévère :	{	XF3 (sans agent de déverglaçage) ³⁾
			XF4 (avec agent de déverglaçage) ⁴⁾
	Gel modéré ou sévère :	Suivant l'altitude	
	Station météorologique :		

1) Absence de salage ou salage peu fréquent
2) Salage fréquent ou très fréquent
3) Absence de salage ou salage peu fréquent
4) Salage fréquent ou très fréquent

NOTE Saint-Pierre et Miquelon et les Terres Australes et Antarctiques Françaises sont classés en zone de gel sévère.

Figure 2 — Carte des zones de gel en France (Figure NA2 de la norme NF EN 206/CN:2014)

NF P 18-470

- f) Les classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 issues des « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » publiées par le LCPC en août 2007 [3] sont introduites pour décrire le caractère plus ou moins saturé en eau de l'environnement immédiat des parties de l'ouvrage.

NOTE Il convient que le choix des classes d'exposition s'appuie sur les guides [4] préparés par l'Ecole Française du Béton :

- « Guides pour le choix des classes d'exposition des ouvrages de bâtiment coulés en place ou préfabriqués »
- « Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton »
- « Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages maritimes et fluviaux »
- « Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'équipement de la route »
- « Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés »
- « Guide pour le choix des classes d'exposition des tranchées couvertes, galeries, casquettes et caissons immergés »
- « Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages divers de génie civil »

4.2.1.2 Cas particulier des attaques chimiques

Les valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques par les sols et eaux souterraines naturels sont données au Tableau 3.

Tableau 3 — Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques par les sols et eaux souterraines naturels

Caractéristique chimique	Méthode d'essai de référence	XA1	XA2	XA3
Eaux souterraines				
SO ₄ ²⁻ , en mg/l	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0
CO ₂ agressif, en mg/l	NF EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ , en mg/l	ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg ²⁺ , en mg/l	NF EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 jusqu'à saturation
Sols				
SO ₄ ²⁻ total, en mg/kg ^a	NF EN 196-2 ^b	≥ 2 000 et ≤ 3 000 ^c	> 3 000 ^c et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Acidité selon Baumann-Gully, en ml/kg	NF EN 16502	> 200	N'est pas rencontrée dans la pratique	

^a Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10⁻⁵ m/s peuvent être affectés à une classe inférieure.

^b La méthode d'essai prescrit l'extraction du SO₄²⁻ à l'acide chlorhydrique ; il est également possible de procéder à cette extraction à l'eau, si l'on dispose d'une expérience en la matière sur le lieu d'utilisation du béton.

^c La limite doit être ramenée de 3 000 mg/kg à 2 000 mg/kg en cas de risque d'accumulation d'ions sulfate dans le béton en raison de l'alternance de périodes sèches et de périodes humides ou d'absorption capillaire.

En complément du Tableau 3 il convient de se reporter au fascicule de documentation FD P 18-011 dans le cas de risques d'attaque par des eaux faiblement minéralisées ou par des milieux gazeux. À défaut d'étude particulière ce fascicule de documentation sert de référence pour le choix du liant (ciment et addition) en fonction de l'environnement.

NF P 18-470

En complément du Tableau 3, une étude particulière peut être nécessaire pour déterminer la classe d'exposition adéquate dans les environnements suivants :

- a) n'entrant pas dans les limites du Tableau 3 ;
- b) contenant d'autres substances chimiques agressives ;
- c) sol ou eau pollué(e) chimiquement ;
- d) environnement agressif en milieu industriel ;
- e) présentant une vitesse d'écoulement de l'eau élevée, en combinaison avec certaines substances chimiques du Tableau 3.

Les environnements chimiques agressifs classés dans le Tableau 3 sont fondés sur des sols et eaux souterraines naturels, dont la température est comprise entre 5 °C et 25 °C, et où la vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment faible pour être assimilée à des conditions statiques. Le choix de la classe se fait par rapport à la caractéristique chimique correspondant à l'agression la plus élevée. Lorsqu'au moins deux caractéristiques agressives correspondent à une même classe, l'environnement doit être classé dans la classe immédiatement supérieure, sauf si une étude spécifique démontre que ce n'est pas nécessaire dans ce cas.

4.2.2 Classes de résistance aux transferts

4.2.2.1 Seuils de base

Les BFUP doivent satisfaire aux trois exigences suivantes :

- a) porosité à l'eau à 90 jours $\leq 9,0 \%$ (selon la norme NF P 18-459) ;
- b) coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours $\leq 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ selon la norme XP P 18-462 adaptée suivant les dispositions de l'Article A.1 ;
- c) perméabilité apparente aux gaz à 90 jours $\leq 9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ selon la norme XP P 18-463:2011 adaptée suivant les dispositions du paragraphe A.2.1.

NOTE Ces critères situent les BFUP dans la gamme des matériaux cimentaires à durabilité potentielle très élevée pour les classes d'exposition XC, XS, XD et XF, au sens du guide AFGC [5].

4.2.2.2 Classes de durabilité potentielle améliorée

Le BFUP peut appartenir à l'une ou l'autre des classes suivantes de durabilité potentielle améliorée, selon l'atteinte des seuils ci-après :

- a) Dp+ : porosité améliorée :
porosité à l'eau à 90 jours $\leq 6,0 \%$ (selon la norme NF P 18-459) ;
- b) Dc+ : résistance améliorée à la diffusion des ions chlorure :
coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours $\leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ selon la norme XP P 18-462 adaptée suivant les dispositions de l'Article A.1 ;

NOTE 1 Dans l'attente de l'homologation de la norme XP P 18-462, des valeurs comprises entre $0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ peuvent être acceptées si l'incertitude de mesure rend une valeur $\leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ non significative.

c) Dg+ : résistance améliorée aux transferts gazeux :

perméabilité apparente aux gaz à 90 jours $\leq 1.10^{-19} \text{ m}^2$ selon la norme XP P 18-463:2011 adaptée suivant les dispositions du paragraphe A.2.2.

NOTE 2 Ces classes de durabilité potentielle améliorée sont notamment valorisées lorsque l'exposition particulièrement sévère ou la durée d'utilisation du projet particulièrement longue le justifient, comme précisé en 5.3.3.

4.2.3 Classes d'exposition à l'abrasion et classes de résistance à l'abrasion

La sévérité de l'exposition à l'abrasion d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage est décrite par les classes XM1, XM2 et XM3 en cohérence avec la norme NF P 18-710:2016.

Vis-à-vis de l'abrasion associée à des écoulements hydrauliques, le BFUP est classé par sa performance sur la base de son indice d'abrasion, déterminé conformément à l'Annexe I, consistant à comparer l'empreinte formée dans le matériau soumis à un jet de sable à celle qui se forme sur du verre :

- a) classe RM1 : $1 \leq \text{indice d'abrasion} < 1,5$ (matériau résistant à l'abrasion « hydraulique ») ;
- b) classe RM2 : $0,7 \leq \text{indice d'abrasion} < 1$ (matériau très résistant à l'abrasion « hydraulique ») ;
- c) classe RM3 : $\text{indice d'abrasion} < 0,7$ (matériau ultra-résistant à l'abrasion « hydraulique »).

4.3 Classes correspondant aux BFUP frais et en cours de maturation

4.3.1 Classes de consistance

À l'état frais, le BFUP doit rester homogène et ne doit pas présenter de ségrégation des fibres ni d'une fraction solide des constituants compte tenu des moyens de mise en œuvre.

La consistance du BFUP à l'état frais fait normalement l'objet d'une spécification associée à une valeur cible.

Dans le cas contraire, le BFUP doit être classé selon sa consistance à l'état frais. Il appartient alors à l'une des trois classes de consistance suivantes :

- a) Ca : BFUP susceptible d'être autoplaçant, c'est-à-dire généralement susceptible d'être mis en place sans vibration ni aide mécanique à l'écoulement ;
- b) Cv : BFUP visqueux, c'est-à-dire généralement susceptible d'être mis en place sans vibration mais qui nécessite une aide mécanique à l'écoulement ;
- c) Ct : BFUP à seuil, c'est-à-dire généralement susceptible de s'écouler sous l'effet d'un cisaillement dynamique mais dont la surface libre au repos est susceptible de tenir une pente.

La classe de consistance choisie doit être associée à la durée pratique d'utilisation au cours de laquelle le maintien de cette consistance est demandé.

Pour les classes Ct, il convient que l'aptitude à la mise en œuvre soit assurée dans les conditions du projet, et caractérisée par une performance mesurée selon un mode opératoire faisant l'objet d'un accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur.

Les domaines de consistance correspondant à ces classes sont caractérisés par l'un des essais suivants, adapté à la taille des fibres et des granulats composant le BFUP.

NF P 18-470

La classification est déterminée comme indiqué au Tableau 4 :

Tableau 4 — Classes de consistance pour les BFUP

Classe	Étalement à la table à chocs (selon la norme NF EN12350-5) mm	Étalement au cône ASTM sans choc (adapté de la norme ASTM C230/C230M) mm	Étalement au cône d'Abrams (par référence à la norme NF EN 12350-8) mm
Ca	Sans choc : ≥ 560	≥ 270	≥ 760 (SF3)
Cv	Sans choc : 420 à 560 Après 15 chocs : > 560	230 à 270	660 à 760 (SF2)
Ct	Sans choc : < 420 Après 15 chocs : > 560	< 230	< 660 (SF1)

NOTE Le choix de l'essai est déterminé d'un commun accord entre le prescripteur, l'utilisateur et le fournisseur du BFUP. Pour un BFUP, il est noté que l'incertitude de mesure associée à ces essais est telle que le résultat est arrondi au centimètre (10 mm).

4.3.2 Classes en fonction de la dimension maximale des granulats

Lorsque le BFUP est classé selon la dimension maximale des granulats, la classification doit se faire à partir de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le BFUP (D_{sup}) conformément à la norme NF EN 12620+A1. D_{sup} est inférieur ou égal à 10 mm.

NOTE D_{sup} est la dimension maximale du tamis par laquelle la dimension des granulats est déterminée selon la norme NF EN 12620+A1.

4.3.3 Classes de traitement thermique

Le BFUP est classé selon le traitement thermique qui lui est éventuellement appliqué pour atteindre ses propriétés à l'état durci mature.

Le BFUP est classé STT lorsqu'il ne fait l'objet d'aucun traitement thermique.

Le BFUP est classé TT1 lorsqu'il fait l'objet d'une « cure thermique » ou « accélération de l'hydratation par traitement thermique » ou « étuvage » qui vise à anticiper le début de prise et accélérer la prise et le durcissement initial dans le moule par application d'un chauffage modéré. La résistance en compression moyenne mesurée à 28 jours après application d'un tel traitement thermique ne doit pas être inférieure à 88 % de la résistance en compression moyenne à 28 jours du même BFUP produit et conservé à 20 °C \pm 2 °C et qui n'aurait fait l'objet d'aucun traitement thermique (actif ou passif).

Le BFUP est classé TT2 lorsqu'il fait l'objet, plusieurs heures après la prise, d'un traitement thermique à température relativement élevée (de l'ordre de 90 °C) et à un degré d'humidité supérieur à 90 % pendant quelques dizaines d'heures. La résistance en compression moyenne mesurée à 28 jours après application d'un tel traitement thermique ne doit pas être inférieure à la résistance en compression moyenne à 28 jours du même BFUP produit et conservé à 20 °C \pm 2 °C et qui n'aurait fait l'objet d'aucun traitement thermique (actif ou passif).

Le BFUP est classé TT1+2 lorsqu'il fait l'objet des deux types de traitement thermique ci-dessus appliqués successivement. La résistance en compression moyenne mesurée à 28 jours après application d'un tel traitement thermique ne doit pas être inférieure à la résistance en compression moyenne à 28 jours du même BFUP produit et conservé à 20 °C \pm 2 °C et qui n'aurait fait l'objet d'aucun traitement thermique (actif ou passif).

NOTE L'accompagnement du refroidissement d'une structure ou d'un élément en BFUP ne constitue pas une classe de traitement thermique et relève de la norme NF P 18-451.

4.4 Classes correspondant aux propriétés des BFUP durcis

4.4.1 Classes de résistance à la compression

Le BFUP est classé en fonction de sa résistance en compression par référence à sa résistance caractéristique à 28 jours f_{ck-cyl} mesurée sur cylindres de dimensions nominales 110 mm/220 mm, communément appelés « 11/22 », selon la norme NF EN 12390-3:2012, les éprouvettes satisfaisant aux normes NF EN 12390-1 et NF EN 12390-2, et conformément aux précisions des Annexes B et C du présent document. La classification est donnée au Tableau 5. En outre, il est possible d'utiliser des niveaux de résistance intermédiaires, arrondis à 5 MPa près.

Si le contrôle de la résistance du BFUP en phase de production est envisagé sur éprouvettes cubiques, la résistance en compression du BFUP doit être mesurée sur des cubes de 10 cm d'arête et la valeur caractéristique $f_{ck-cube}$ peut être déterminée. Toutefois dans ce cas, en épreuve d'étude la double détermination de la résistance à la fois sur cylindres et sur cubes, avec un nombre suffisant d'échantillons, est nécessaire pour s'assurer de la validité de la valeur utilisée pour le projet, et la détermination sur cylindres prévaut pour classer le BFUP. En phase de contrôle, alternativement à une comparaison directe de la valeur $f_{ck-cube}$ par rapport aux limites de classes du Tableau 5 ou aux niveaux intermédiaires utilisés, la détermination sur cube peut être pondérée par le coefficient de passage déterminé en phase d'étude pour estimer f_{ck-cyl} et vérifier la conformité à la classe.

NOTE Ces dispositions tiennent compte de la difficulté de dégager une relation unique entre f_{ck-cyl} et $f_{ck-cube}$.

Tableau 5 — Classes de résistance à la compression pour les BFUP

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale indicative sur cubes
	f_{ck-cyl} MPa	$f_{ck-cube}$ MPa
BFUP 130 / 145	130	145
BFUP 150 / 165	150	165
BFUP 175 / 190	175	190
BFUP 200 / 215	200	215
BFUP 225 / 240	225	240
BFUP 250 / 265	250	265

4.4.2 Classes de masse volumique

Les BFUP couverts par le présent document doivent avoir une masse volumique sèche (incluant évidemment les fibres) comprise entre 2 200 kg/m³ et 2 800 kg/m³. Ils sont réputés de masse volumique normale, le calcul des structures tenant compte en tant que de besoin de la valeur effective de la masse volumique selon le BFUP utilisé.

Le présent document ne prévoit pas de classes de BFUP légers ou lourds en-deçà ou au-delà de cette plage de masses volumiques.

NF P 18-470

4.4.3 Classes de comportement en traction

Le comportement en traction des BFUP qui sert de référence au calcul de l'ouvrage et à la spécification du matériau doit être déterminé par analyse inverse de résultats d'essais de flexion selon la procédure décrite en Annexe D (essais sur prismes) ou en Annexe E (essais sur plaques minces), selon la géométrie des éléments du projet, et en intégrant la prise en compte sur la phase post-fissuration du facteur d'orientation K traduisant l'effet de la mise en œuvre du BFUP dans la structure, le produit ou le composant d'ouvrage, selon la partie d'ouvrage concernée et la direction considérée. Les facteurs d'orientation K doivent être déterminés lors de l'épreuve de convenance pour l'ouvrage ou l'élément considéré conformément à l'Annexe F.

Les BFUP couverts par le présent document doivent avoir une valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction à 28 jours $f_{ctk,el}$ supérieure à 6,0 MPa.

Les BFUP couverts par le présent document doivent avoir un comportement suffisamment écrouissant en flexion, au sens où ils doivent vérifier l'inégalité (1) suivante :

$$\frac{1}{w_{0,3}} \int_0^{w_{lim}} \frac{\sigma(w)}{1,25} dw \geq \max(0,4 f_{ctm,el}; 3 \text{MPa}) \quad (1)$$

où

$w_{0,3} = 0,3 \text{ mm}$;

$f_{ctm,el}$ est la valeur moyenne de la limite d'élasticité en traction, en MPa ;

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

La classe de comportement en traction du BFUP est obtenue par comparaison de la limite d'élasticité $f_{ct,el}$ et de la résistance post-fissuration f_{ctf} , pour la courbe moyenne et la courbe caractéristique. Elle est déterminée a priori en intégrant de façon forfaitaire la prise en compte sur la phase post-fissuration du facteur d'orientation K_{global} traduisant l'effet de la mise en œuvre du BFUP dans la structure, le produit ou le composant d'ouvrage, conformément à l'Annexe F, en adoptant pour ce facteur une valeur postulée de 1,25.

Le BFUP est de classe T1 (adoucissant en traction directe) lorsque $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique, soit $f_{ctfm}/1,25 < f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$.

Le BFUP est de classe T2 (peu écrouissant) lorsque $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ pour la courbe moyenne et que $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ pour la courbe caractéristique, soit $f_{ctfm}/1,25 \geq f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$.

Le BFUP est de classe T3 (très écrouissant) lorsque $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique, soit $f_{ctfm}/1,25 \geq f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 \geq f_{ctk,el}$.

4.5 Désignation

Les BFUP de type M dont la résistance caractéristique à la compression 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.

NOTE Les BFUP-S sont réputés utilisables pour le calcul des ouvrages, des produits préfabriqués et composants préfabriqués des ouvrages selon la norme NF P 18-710:2016.

5 Exigences

5.1 Exigences relatives aux constituants

5.1.1 Généralités

Les constituants ne doivent pas contenir de substances nocives en quantités telles qu'elles puissent avoir un effet préjudiciable sur la durabilité du BFUP ou induire une corrosion des armatures le cas échéant. Ils doivent être aptes à l'emploi pour l'utilisation envisagée du BFUP.

Lorsque l'aptitude à l'emploi d'un constituant est établie, cela ne signifie pas qu'il puisse être utilisé dans tous les cas ou quelle que soit la composition du BFUP.

Seuls les constituants dont l'aptitude à l'emploi pour l'utilisation prescrite est établie doivent être utilisés dans les BFUP conformes au présent document. Ceci peut conduire à requérir des tolérances réduites sur tout ou partie de leurs propriétés par rapport aux exigences des normes qui les couvrent, pour garantir l'atteinte des propriétés du BFUP. L'établissement de ces tolérances et des précisions de dosage fait partie de l'étude de la composition du BFUP (voir 5.2).

5.1.2 Ciments

Pour l'emploi dans du BFUP, le ciment doit être conforme à la norme NF EN 197-1. L'aptitude générale à l'emploi est établie pour les ciments CEM I 52,5 ou CEM II/A 52,5. L'aptitude à l'emploi d'autres types ou classes de ciment nécessite une validation sur la base d'une étude particulière tenant compte des variations potentielles des caractéristiques, de la nature et de la teneur des constituants.

En l'absence d'étude particulière, pour des durées d'utilisation de projet égales ou supérieures à 100 ans, les ciments doivent être conformes à la norme NF P 15-317 pour être aptes à l'emploi dans l'environnement particulier de l'eau de mer (classes XS2 et XS3). En outre, la composition des constituants du liant du BFUP exposé à cet environnement (teneur en sulfures, en sulfates, etc.) doit être telle que le liant respecte également les exigences de la norme NF P 15-317.

En l'absence d'étude particulière, pour des durées d'utilisation de projet égales ou supérieures à 100 ans, les ciments destinés à l'emploi dans l'environnement particulier du contact avec des eaux ou sols contenant des sulfates (classes XA2 ou XA3) doivent être choisis conformément aux dispositions du fascicule de documentation FD P 18-011.

En l'absence d'étude particulière, les ciments destinés à l'emploi dans l'environnement particulier du contact avec des eaux pures, ou des eaux ou sols acides (en classes XA2 et XA3, et pour des durées d'utilisation de projet égales ou supérieures à 100 ans en classe XA1) doivent être :

- a) choisis conformément au fascicule de documentation FD P 18-011 ;
- b) des CEM II/A-D, ou des CEM II/A-Q ;
- c) des CEM I ou CEM II/A avec addition d'au moins 6 % de fumée de silice ou d'au moins 6 % de métakaolin (en pourcentage de la masse totale de ciment et d'additions).

En l'absence d'étude particulière, dans les autres situations d'agressions chimiques, il convient que le liant du BFUP soit choisi par référence au fascicule de documentation FD P 18-011 lorsque l'agression correspondante, associée à une classe XA1, XA2 ou XA3, y est prévue, sauf pour la classe XA1 associée à une durée d'utilisation de projet de 50 ans.

NF P 18-470

Pour les éléments en BFUP précontraint par pré-tension ou post-tension dont la durée d'utilisation de projet est égale ou supérieure à 100 ans, en l'absence d'étude particulière, le ciment doit être classé CP2 conformément aux spécifications de la norme NF P 15-318. Toutefois pour des éléments en BFUP précontraints par post-tension dont la durée d'utilisation de projet est de 100 ans, le ciment peut être classé CP1 conformément aux spécifications de la norme NF P 15-318.

5.1.3 Granulats

L'aptitude générale à l'emploi est établie pour les granulats de masse volumique normale et les granulats lourds conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545. Les caractéristiques des granulats doivent être indicées A selon la norme NF P 18-545. En particulier, le coefficient d'absorption d'eau des granulats doit être inférieur ou égal à 2,5 %, sauf étude particulière portant notamment sur le maintien de la rhéologie.

En l'absence d'étude particulière les granulats doivent être classés NR vis-à-vis du risque d'alcali-réaction au sens des fascicules de documentation FD P 18-464 et FD P 18-542.

5.1.4 Eau de gâchage

L'aptitude générale à l'emploi est établie pour l'eau potable et les eaux d'origine souterraine conformes à la norme NF EN 1008.

5.1.5 Adjuvants

L'aptitude à l'emploi est établie pour les adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2+A1.

5.1.6 Additions minérales et pigments

L'aptitude générale à l'emploi comme addition est établie :

- a) pour des fillers conformes à la norme NF EN 12620+A1 ;
- b) pour des pigments conformes à la norme NF EN 12878 ;
- c) pour des additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508 ;
- d) pour des additions siliceuses conformes à la norme NF P 18-509 ;
- e) pour des cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1 ;
- f) pour des fumées de silice conformes à la norme NF EN 13263-1+A1 ;
- g) pour des laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau conformes à la norme NF EN 15167-1 s'ils sont en outre de classe A au sens de la norme NF EN 206/CN:2014 ;
- h) pour des métakaolins de type A conformes à la norme NF P 18-513.

5.1.7 Fibres contribuant à assurer la non-fragilité

Les fibres contribuant à assurer la non-fragilité du BFUP au sens de 4.4.3 sont aptes à l'emploi si elles sont conformes à l'une des normes de fibres pour béton suivantes :

- NF EN 14889-1 (fibres d'acier) pour les BFUP de type M (plusieurs catégories de fibres d'acier pouvant être combinées) ;

- NF EN 14889-2 (fibres polymères) pour les BFUP de type A, lorsque ce sont des fibres d'alcool polyvinylique (PVA). L'aptitude à l'emploi d'autres types de fibres polymères conformes à cette norme nécessite une validation sur la base d'une étude particulière vérifiant notamment le maintien dans le temps des performances mécaniques du BFUP incorporant ces fibres suffisamment au-dessus des valeurs de calcul (résistances, ductilité), en particulier sous l'effet de la température, de cycles d'immersion/séchage, de cycles de gel/dégel et de cycles de chargement susceptibles de produire des effets de fatigue.

D'autres fibres peuvent être utilisées pour contribuer à conférer au BFUP un comportement écrouissant en flexion au sens de 4.4.3, à condition qu'elles soient couvertes par une norme ou un avis technique qui en prévoit l'emploi dans un BFUP conforme au présent document et indique spécifiquement dans quel type de BFUP elles peuvent être incorporées et les restrictions éventuelles par rapport aux modalités d'application du présent document. Le maintien dans le temps des performances mécaniques du BFUP suffisamment au-dessus des valeurs de calcul (résistances, ductilité) doit notamment avoir été vérifié, en particulier sous l'effet de la température, de cycles d'immersion/séchage, de cycles de gel/dégel et de cycles de chargement susceptibles de produire des effets de fatigue.

5.1.8 Autres fibres apportant des caractéristiques complémentaires

D'autres fibres peuvent être utilisées pour contribuer à apporter au BFUP des caractéristiques complémentaires, à condition que ces fibres soient couvertes par une norme ou un avis technique qui en prévoit l'emploi dans un BFUP conforme au présent document et indique spécifiquement dans quel type de BFUP elles peuvent être incorporées.

Les fibres de polypropylène conformes à la norme NF EN 14889-2 sont réputées aptes à l'emploi dans la mesure où elles contribuent à prévenir le risque d'écaillage des BFUP de type M ou A en cas d'incendie.

5.1.9 Ajouts

Des ajouts peuvent être incorporés au BFUP pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés spécifiques, et sous réserve d'une étude particulière vérifiant la maîtrise des effets secondaires éventuels. La teneur limite volumique de l'ensemble des ajouts ne doit pas excéder 5 %. Dans le cas d'utilisation d'ajouts, la composition du BFUP avec et sans ajout doit être considérée comme différente et il y a lieu de réaliser le cas échéant une nouvelle épreuve d'étude.

5.1.10 Cas des pré-mélanges de constituants

Les BFUP peuvent être préparés à partir de constituants pré-dosés et pré-mélangés, comprenant :

- a) le ciment et les additions ;
- b) éventuellement, tout ou partie des granulats ;
- c) éventuellement, des adjuvants sous forme solide ;
- d) éventuellement, des pigments sous forme solide ;
- e) éventuellement, des ajouts ;
- f) éventuellement, tout ou partie des fibres.

L'aptitude à l'emploi de chacun de ces constituants pris isolément doit être établie par application de 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3, 5.1.5, 5.1.6, 5.1.7, 5.1.8 et 5.1.9 selon la nature du constituant considéré.

NF P 18-470

Pour le pré-mélange, la régularité des constituants, leur compatibilité et la précision des dosages doivent avoir été vérifiées afin de permettre d'atteindre les performances requises pour produire des BFUP qui disposent alors d'une carte d'identité (voir 5.6). Les matériels de dosage et la procédure de fabrication doivent permettre de satisfaire une tolérance de $\pm 2 \%$ sur le dosage de chaque constituant du pré-mélange, à l'exception des fibres éventuelles pour lesquelles la tolérance est de $(- 2 \%; + 4 \%)$. L'historique de l'enregistrement automatique des pesées des quantités de matières premières introduites dans le mélangeur, doit permettre de vérifier le respect de cette tolérance. Les enregistrements doivent être conservés au moins 12 mois.

Une fiche permettant d'identifier le pré-mélange et ses références de production et attestant de la réalisation des contrôles de production doit accompagner chaque lot livré. Le détail de ces contrôles est donné en Annexe G.

5.2 Exigences pour la composition des BFUP

5.2.1 Généralités

Les constituants du BFUP et leurs proportions doivent être choisis au stade de l'épreuve d'étude de manière à satisfaire aux exigences spécifiées vis-à-vis de la durabilité, des propriétés à l'état frais et des caractéristiques à l'état durci, en tenant compte du procédé de production du matériau et de la méthode d'exécution de l'ouvrage considéré y compris les traitements appliqués après mise en œuvre et permettant d'atteindre ces propriétés.

Le producteur doit notamment sélectionner les types et les classes des constituants parmi ceux dont l'aptitude à l'emploi est établie pour les conditions d'environnement spécifiées.

La composition du BFUP doit minimiser les phénomènes de ségrégation, de ressuage et d'hétérogénéité de la répartition des fibres dans l'ouvrage. À ce titre la maîtrise des quantités d'eau apportées dans le BFUP par les différents constituants (eau d'ajout, eau absorbée par les granulats, eau des adjuvants) doit faire l'objet d'une attention particulière. Que les constituants du BFUP soient utilisés sous forme de composants pré-mélangés ou non, un soin particulier doit être apporté au suivi de leur régularité.

La formule nominale d'un BFUP doit être fixée en épreuve d'études ou par référence à une carte d'identité pour obtenir un mètre cube de matériau en œuvre. Elle doit être proposée par le producteur qui s'engage sur l'atteinte des spécifications performantielles déterminées par le prescripteur. Cette formule doit être confirmée par l'épreuve de convenance destinée à vérifier l'atteinte des performances spécifiées dans les conditions de production, de mise en œuvre et de traitement prévues.

La composition rendue contractuelle doit être définie par la quantité de chaque constituant apporté séparément et, le cas échéant, par la quantité du ou des pré-mélange(s) de constituants.

Pour les constituants apportés séparément, la formule nominale doit indiquer :

- a) la dénomination et le poids des diverses catégories de granulats (matériaux secs) ;
- b) la dénomination et le poids du ciment (avec indication de la quantité de fumée de silice dans le cas d'un ciment contenant de la fumée de silice) ;
- c) la dénomination et le poids sec de chaque addition, pigment et ajout éventuel ;
- d) le volume total d'eau (eau d'ajout plus volume apporté par les différents constituants) ;
- e) la dénomination et les poids d'extraits secs des adjuvants ;
- f) la dénomination et le poids de chaque type de fibres.

NF P 18-470

Pour les constituants apportés sous forme de pré-mélange, la formule nominale doit indiquer la dénomination et le poids du constituant « composite » correspondant au pré-mélange en faisant référence à sa démonstration d'aptitude à l'emploi (voir 5.1.10).

Les matériels de dosage et la procédure de fabrication doivent permettre de satisfaire une tolérance de $- 2 \%$ et $+ 4 \%$ pour les fibres et de $\pm 2 \%$ pour chaque autre constituant pesé. Le prescripteur doit pouvoir s'assurer que cette exigence est satisfaite et contrôlée par le système qualité du producteur, notamment par une adaptation des portées des balances à la capacité du malaxeur et aux quantités fabriquées. La traçabilité des quantités de constituants pesées puis malaxées et de la séquence de malaxage réalisée doit être assurée.

Une variation de la quantité d'un au moins des constituants excédant les tolérances de pesées ci-dessus doit conduire à considérer la composition du BFUP comme différente, et il y a alors lieu de réaliser une nouvelle épreuve d'étude (sauf dans le cas de l'ajustement de l'adjuvantation traité en 5.2.6).

NOTE De façon plus critique encore que pour les bétons relevant de la norme NF EN 206/CN:2014, les propriétés du BFUP requises pour son utilisation dans l'ouvrage ne peuvent être obtenues que par un strict respect de procédures d'exécution concernant le matériau à l'état frais et en phase de durcissement. Aussi, il convient que les exigences relatives au transport, à la mise en place, à la cure et aux traitements ultérieurs soient prises en compte avant de spécifier le BFUP.

5.2.2 Choix du ciment

Le ciment doit être choisi parmi ceux dont l'aptitude à l'emploi est établie et en prenant en considération :

- a) l'exécution de l'ouvrage ;
- b) l'utilisation finale du BFUP et de l'ouvrage, y compris les exigences associées aux parements ;
- c) les conditions de cure et de traitement thermique éventuel ;
- d) les dimensions de la structure (développement de chaleur) ;
- e) la prévention de toute fissuration liée à des déformations thermiques gênées et de toute formation d'ettringite différée ;
- f) les agressions environnementales auxquelles la structure est exposée (voir 4.1) ;
- g) la réactivité potentielle des granulats aux alcalins des constituants ;
- h) la compatibilité avec les adjuvants.

5.2.3 Utilisation des granulats

La nature, le type, la dimension et les catégories de granulats doivent être sélectionnés en tenant compte :

- a) de l'exécution de l'ouvrage ;
- b) de l'utilisation finale du BFUP (propriétés spécifiées) et de l'ouvrage ;
- c) des agressions environnementales auxquelles la structure est exposée ;
- d) de la prévention de toutes réactions alcali-granulats (en l'absence d'étude particulière les granulats doivent être classés NR vis-à-vis du risque d'alcali-réaction au sens des fascicules de documentation FD P 18-464 et FD P 18-542) ;
- e) des exigences liées aux parements.

NF P 18-470

La dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le BFUP (D_{sup}) doit être sélectionnée en tenant compte des dimensions minimales des sections et de l'enrobage des éventuelles armatures de précontrainte ou de béton armé.

5.2.4 Utilisation des eaux recyclées

Les eaux récupérées de la fabrication de béton ou de BFUP ne doivent pas être utilisées.

5.2.5 Utilisation des additions

L'utilisation d'additions participe à l'obtention d'une compacité élevée de la matrice cimentaire des BFUP, et de la résistance élevée en compression. Plusieurs types d'additions peuvent généralement être utilisés, dont des additions ultrafines à propriétés pouzzolaniques, dans des proportions optimisées. La composition du BFUP éventuellement récapitulée dans la carte d'identité du BFUP (voir 5.5) et validée lors des épreuves d'étude et de convenance doit intégrer l'ensemble des additions utilisées, sans substitution d'une addition par une autre ni substitution au ciment possible.

Pour les éléments en BFUP précontraint dont la durée d'utilisation de projet est supérieure ou égale à 100 ans, la composition des additions et leur dosage doivent être tels que la teneur en sulfures du liant n'excède pas 0,2 %.

5.2.6 Utilisation d'adjuvants

La quantité totale d'adjuvants utilisée ne doit pas dépasser le dosage maximal recommandé par le fabricant de chaque adjuvant, sauf si l'effet d'un dosage plus fort sur les performances du BFUP est établi et pris en compte.

Lorsque plusieurs adjuvants sont utilisés, leur compatibilité doit être vérifiée préalablement aux épreuves d'étude et de convenance.

Le mode d'introduction des adjuvants (dispersion éventuelle dans l'eau de gâchage, introduction éventuelle en plusieurs phases, ...) doit avoir été étudié préalablement à l'épreuve d'étude. En cas de variation climatique significative conduisant à une modification de l'adjuvantation, cette modification doit entraîner un complément d'épreuve de convenance.

5.2.7 Utilisation de fibres contribuant à assurer la non-fragilité

Le type, la dimension et la quantité de fibres qui contribuent à assurer la non-fragilité du BFUP au sens de 4.4.3 doivent être sélectionnés en tenant compte :

- a) de l'utilisation finale du BFUP (propriétés spécifiées, notamment performances mécaniques) et de l'ouvrage ;
- b) des agressions environnementales auxquelles la structure est exposée ;
- c) du mode de mise en place du BFUP et de l'exécution de l'ouvrage ;
- d) des exigences liées aux parements.

Les fibres conformes au type et à la quantité spécifiés doivent être ajoutées au mélange selon un mode opératoire qui assure l'uniformité de leur répartition dans l'ensemble de la gâchée.

5.2.8 Utilisation de fibres apportant des caractéristiques complémentaires

Le type, la dimension et la quantité de fibres apportant des caractéristiques complémentaires doivent être sélectionnés en tenant compte :

- a) de l'utilisation finale du BFUP et de l'ouvrage ;
- b) des agressions environnementales auxquelles la structure est exposée ;
- c) du mode de mise en place du BFUP et de l'exécution de l'ouvrage ;
- d) des exigences liées aux parements.

C'est en effet vis-à-vis d'un ou plusieurs de ces aspects que les caractéristiques complémentaires apportées par les fibres sont recherchées et doivent être évaluées.

Les fibres conformes au type et à la quantité spécifiés doivent être ajoutées au mélange selon un mode opératoire qui assure l'uniformité de leur répartition dans l'ensemble de la gâchée.

5.2.9 Utilisation de pré-mélanges de constituants

L'utilisation et le choix éventuels d'un pré-mélange de constituants pour produire un BFUP doivent tenir compte :

- a) de la nature de l'ouvrage et de ses parties, et de leur mode d'exécution, notamment des conditions de cure et de traitement thermique éventuel ;
- b) de l'utilisation finale du BFUP et de l'ouvrage, et des propriétés requises, y compris les exigences associées aux parements ;
- c) des agressions auxquelles la structure est exposée et des exigences de durabilité.

L'utilisation d'un pré-mélange de constituants permet de s'appuyer sur une expérience industrielle documentée concernant des BFUP produits avec ce pré-mélange, qui disposent d'une carte d'identité (voir 5.1.10).

L'adjonction des constituants complémentaires au pré-mélange de constituants et la suite de la séquence de production du BFUP doivent respecter les préconisations du producteur du pré-mélange de constituants.

5.2.10 Température du BFUP frais

La température du BFUP frais au moment de sa livraison et de sa mise en place (que ce soit en phase de production, en épreuve d'étude ou en épreuve de convenance) ne doit être ni inférieure à 10 °C ni supérieure à 35 °C, sauf dispositions spécifiques résultant d'une étude particulière ou données dans la carte d'identité du BFUP et acceptées conjointement par les parties concernées.

5.2.11 Teneur en chlorures

La teneur en chlorures d'un BFUP, exprimée en pourcentage de masse d'ions chlorure rapportée à la masse de ciment, ne doit pas dépasser :

- a) 0,20 % pour un BFUP non armé de type M, sauf justification particulière liée à la résistance éprouvée des fibres vis-à-vis de la corrosion, ou contenant des armatures de précontrainte par post-tension en acier ;
- b) 0,15 % pour un BFUP de type A ou M utilisé dans des éléments contenant des armatures de précontrainte par pré-tension en acier ;
- c) 0,40 % dans tous les autres cas.

NF P 18-470

5.2.12 Protocole de malaxage

Les principes généraux d'ordre d'introduction des constituants et, le cas échéant, de caractéristiques physiques cibles à obtenir à l'issue des différentes phases de malaxage, doivent figurer dans la carte d'identité du BFUP ou être déterminés à l'issue de l'épreuve d'étude.

NOTE De manière générale, le malaxage des BFUP comporte, en première phase, une homogénéisation des poudres et matières granulaires, en deuxième phase, l'introduction de l'eau et de tout ou partie des adjuvants jusqu'à obtenir une consistance suffisamment fluide et, en troisième phase, l'introduction des fibres.

Un protocole de malaxage associé à la formule nominale du BFUP et adapté aux conditions réelles de production doit ensuite être défini dans le respect des dispositions de la norme NF P 18-451 et validé à l'issue de l'épreuve de convenance.

Il est alors fixé pour la suite de la production, et vise en particulier à assurer l'homogénéité de la composition granulaire dans le volume de BFUP fabriqué, l'homogénéité de la répartition des fibres dans la gâchée, l'absence d'agglomération en oursins et l'absence d'agglomérats dépourvus de fibres, et les propriétés de consistance nécessaires au transport et à la mise en place du BFUP. La capacité à assurer ces propriétés doit être vérifiée régulièrement, par des essais sur BFUP frais et/ou durci, en application des spécifications d'exécution décrites dans la norme NF P 18-451.

5.3 Exigences liées aux classes d'exposition (durabilité et abrasion)

5.3.1 Généralités

Pour que l'ouvrage en BFUP résiste aux agressions environnementales, il doit avoir été conçu dans le respect des exigences de la norme NF P 18-710:2016 (notamment Articles 4 et 7), et respecter les exigences concernant le matériau définies dans le présent document en termes de valeurs limites pour la composition du BFUP (voir 5.3.2), et d'exigences performantielles sur certaines propriétés du matériau (voir 5.3.3 et 5.3.4). Ces exigences doivent tenir compte de la durée d'utilisation prévue au projet de la structure en BFUP.

5.3.2 Exigences pour la composition du BFUP

Le ciment doit vérifier les exigences du 5.1.2, de même que le liant lorsque l'ouvrage est situé dans un environnement décrit par les classes d'exposition XA1, XA2 ou XA3.

Lorsque le risque d'écaillage doit être évité en situation d'incendie prise en compte dans le projet, le BFUP doit comporter un dosage approprié de fibres de polypropylène validé par un essai représentatif.

5.3.3 Exigences performantielles liées à la durabilité

En complément des exigences du 5.3.2, et en l'absence d'une justification spécifique de durabilité, le Tableau 6 récapitule les exigences performantielles qui s'appliquent aux BFUP pour assurer la durabilité des ouvrages en fonction de leur exposition et de la durée d'utilisation prévue au projet (DUP, dont les valeurs sont définies par référence à la norme NF EN 1990).

Tableau 6 — Exigences performantielles liées à la durabilité

Classe d'exposition	DUP(a)	Exigence	Commentaire
XC1, XC2, XC3, XC4	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	Dp+, Dg+	
XS1, XS2, XD1, XD2, XF2	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	
XF1, XF3	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
XS3, XD3	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	Dp+, Dc+	
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	
XF4	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	Dp+, Dc+, Dg+	
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+ et étude spécifique	
XA1	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2 et exigences spécifiques du 5.1.2
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	Et exigences spécifiques du 5.1.2
XA2, XA3	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2 et exigences spécifiques du 5.1.2
	100 ans	Dc+	Et exigences spécifiques du 5.1.2
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	Et exigences spécifiques du 5.1.2 à compléter par une étude spécifique dans le cas XA3 en conditions non statiques
Exigences complémentaires (b) pour la prévention de la réaction sulfatique interne (voir 4.2.1) lorsque la géométrie ou la destination de l'élément, ou le traitement thermique associé au protocole de fabrication et de maturation du BFUP, ne permettent pas d'écarter au cours de la fabrication ou de la vie de la pièce le risque d'exposition à une température supérieure à 65 °C maintenue plus de 4 h.			
XH1	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	Dp+	
XH2	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	(c)	Seuils de base du 4.2.2 et (b)
	150 ans	Dp+ et (c)	
XH3	50 ans	(c)	Seuils de base du 4.2.2 et (b)
	100 ans	Dp+ et (c)	
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+ et (c)	
<p>^a Les exigences indiquées pour une DUP de 150 ans s'appliquent pour des projets exceptionnels dont la DUP est strictement supérieure à 100 ans. À partir de 200 ans une étude particulière est requise.</p> <p>^b Il n'est pas nécessaire d'appliquer ces exigences complémentaires si le dépassement de la température de 65 °C n'intervient qu'en situation accidentelle d'incendie.</p> <p>^c Le risque de réaction sulfatique interne doit être écarté sur la base d'une vérification de performance fondée sur la méthode d'essais LPC66 [6].</p>			

NF P 18-470

5.3.4 Exigences liées au risque d'abrasion

En cas d'exposition au risque d'abrasion associée à un écoulement hydraulique plus ou moins chargé, il est fait appel à la classification correspondante du BFUP (voir 4.2.3) pour spécifier les exigences selon le Tableau 7 :

Tableau 7 — Exigences de résistance à l'abrasion hydraulique

Environnement	Classe
XM1	RM1, RM2 ou RM3
XM2	RM2 ou RM3
XM3	RM3

NOTE Cette classification n'est pas adaptée pour décrire la résistance à un risque d'abrasion par chocs et attrition sans eau ni écoulement de fluide. Dans ce cas, l'utilisation d'un BFUP suffisamment résistant pour se dispenser d'une épaisseur sacrificielle peut faire l'objet d'une exigence définie par le prescripteur.

5.4 Exigences pour les BFUP à l'état frais

5.4.1 Consistance

La consistance du BFUP à l'état frais fait normalement l'objet d'une spécification associée à une valeur cible, qui doit se trouver à l'intérieur d'une plage spécifiée dont la largeur ne doit normalement pas excéder 15 % de la valeur cible et tient compte des moyens de mise en œuvre du BFUP frais. Cette spécification est associée à la donnée d'une durée pratique d'utilisation arrondie au quart d'heure. Elle doit s'exprimer par référence à l'un des essais suivants, adapté à la taille des fibres et des granulats composant le BFUP :

- a) essai d'étalement à la table à chocs (selon la norme NF EN 12350-5) ;
- b) essai d'étalement au cône ASTM (adapté de la norme ASTM C230/C230M) ;
- c) essai d'étalement au cône d'Abrams (par référence à la norme NF EN 12350-8).

NOTE 1 Il convient que le choix de l'essai soit déterminé d'un commun accord entre le prescripteur, l'utilisateur et le fournisseur du BFUP.

NOTE 2 Pour un BFUP, il est noté que l'incertitude de mesure associée à ces essais est telle que le résultat est arrondi au centimètre (10 mm).

À défaut, la consistance du BFUP doit être déterminée par référence aux classes de consistance Ca, Cv ou Ct (voir 4.3.1) et doit être associée à la donnée d'une durée pratique d'utilisation arrondie au quart d'heure.

La consistance doit être vérifiée au moment de l'utilisation du BFUP, après pompage le cas échéant, et avant sa mise en place.

Elle peut être déterminée également immédiatement à la sortie du malaxeur, après transport sur le lieu d'utilisation ou en cours de mise en place, pour les besoins contradictoires des différentes parties prenantes.

5.4.2 Teneur en air

Lorsque la teneur en air d'un BFUP doit être déterminée, elle doit être mesurée conformément à la norme EN 12350-7.

NOTE La résistance d'un BFUP au gel-dégel, avec ou sans sels de déverglaçage, ne nécessite pas de prescriptions particulières de teneur en air, cf. 5.3.3.

5.4.3 Dimension maximale des granulats

Lorsque la dimension nominale supérieure du plus gros granulat (D_{sup}) est à déterminer, elle doit être mesurée selon la norme NF EN 933-1.

NOTE Lorsque D_{sup} doit être déterminée sur le BFUP frais, il convient qu'une procédure de tamisage adaptée de la norme NF EN 933-1, après extraction des granulats par lavage du BFUP frais, soit adoptée avec l'accord des parties concernées.

La dimension nominale supérieure du plus gros granulat (D_{sup}) telle que définie dans la norme NF EN 12620+A1 ne doit pas être supérieure à celle spécifiée.

5.4.4 Homogénéité du BFUP frais avant mise en œuvre

Le producteur de BFUP doit s'assurer que le transport et la manutention du BFUP depuis le malaxeur jusqu'au lieu de mise en œuvre sont effectués de manière à éviter la ségrégation, l'entraînement d'air ou l'intrusion de matières étrangères. Il doit également s'assurer que la durée entre la fabrication du BFUP et la fin de sa mise en place reste compatible avec la durée pratique d'utilisation.

NOTE 1 Les dispositions applicables au transport et à la manutention du BFUP frais avant mise en œuvre, visant à assurer le respect de ces exigences, sont données dans la norme NF P 18-451.

L'introduction éventuelle d'un adjuvant ou d'un complément d'adjuvant après la sortie du BFUP du malaxeur doit être justifiée au stade de l'épreuve d'étude et de l'épreuve de convenance. Cette introduction fait alors partie de la production du BFUP frais et les prélèvements d'échantillons de contrôle doivent être réalisés à l'issue de cette introduction. En-dehors de ce cas, aucun ajout par rapport à la formule nominale de quelque constituant que ce soit ne doit intervenir après la sortie du malaxeur.

Parallèlement à la vérification systématique de consistance, l'homogénéité du BFUP frais doit être vérifiée immédiatement avant sa mise en œuvre. Pour ce faire, des prélèvements doivent être réalisés pour caractériser l'homogénéité de la distribution granulaire, l'homogénéité de la répartition des fibres, l'absence d'agglomération des fibres en oursins, et l'absence d'agglomérats dépourvus de fibres. Ces vérifications, fondées sur l'analyse qualitative ou quantitative de ces prélèvements, doivent être réalisées lors de l'épreuve de convenance, où elles participent de la validation des modalités de transport et de manutention du BFUP relevant des spécifications d'exécution couvertes par la norme NF P 18-451.

Les objectifs à atteindre en termes d'homogénéité du BFUP doivent être déterminés en épreuve de convenance. Les contrôles à réaliser en production sont décrits dans la norme NF P 18-451.

NOTE 2 La détection d'oursins et d'agglomérats dépourvus de fibres est généralement visuelle. Pour les BFUP de type M, la vérification de l'homogénéité de la répartition des fibres peut se faire par pesée après lavage du prélèvement.

5.4.5 Mise en œuvre du BFUP frais et finition

La mise en œuvre du BFUP doit être effectuée conformément à la norme NF P 18-451. Elle doit conserver au matériau son homogénéité et permettre d'atteindre notamment les exigences dimensionnelles, d'aspect et de performances mécaniques spécifiées.

La mise en œuvre du BFUP frais doit éviter de produire de la ségrégation, un entraînement d'air inutile, de perturber l'homogénéité volumique de la répartition des fibres, et de produire une orientation des fibres par écoulement du matériau frais dont la maîtrise n'aurait pas été évaluée quantitativement sur l'élément témoin en épreuve de convenance.

La reproductibilité du processus de mise en œuvre du BFUP frais doit être assurée. Ce processus doit faire l'objet d'un protocole entre les parties concernées, validé à l'issue de l'épreuve de convenance, qui détaille les méthodes et moyens mis en œuvre pour l'atteinte des performances.

NF P 18-470

5.4.6 Température de mise en œuvre

La conformité d'un BFUP au présent document implique que celui-ci soit produit, transporté et mis en place lorsque la température ambiante est supérieure à -5 °C et, en l'absence de dispositions spécifiques détaillées conformément à la norme NF P 18-451, inférieure à 40 °C.

Les plages de température ambiante pour lesquelles la production, le transport et la mise en place du BFUP requièrent des dispositions spécifiques sont fixées, ainsi que ces dispositions, dans la norme NF P 18-451. Leur respect par chacun des intervenants concernés fait partie intégrante de la conformité du BFUP au présent document.

5.4.7 Cure

La cure doit être assurée, et doit être appliquée le plus tôt possible après la mise en œuvre du matériau, jusqu'à ce que la résistance moyenne en compression du BFUP dans la zone la plus critique atteigne au moins 30 % de la valeur f_{ck} spécifiée, à moins qu'une étude spécifique ne démontre l'absence d'effets défavorables d'une valeur cible différente sur les performances et les propriétés de durabilité. Les dispositions permettant d'atteindre cet objectif doivent être validées en épreuve de convenance.

NOTE Le contrôle de l'efficacité de ces dispositions peut être réalisé sur éprouvettes d'information ou par méthode maturométrique adaptée au BFUP.

La norme NF P 18-451 décrit les méthodes permettant d'assurer la cure. Sauf justification particulière, les dispositions destinées à prévenir les effets de l'auto-dessiccation intense et précoce ne dispensent pas de la cure assurée en surface.

La reproductibilité de la cure exige d'intégrer la description des dispositions prévues à cet effet dans le protocole de mise en œuvre du BFUP mentionné en 5.4.5, validé à l'issue de l'épreuve de convenance, et faisant l'objet d'un accord de l'utilisateur du BFUP et du prescripteur. Outre l'atteinte de la résistance en compression suffisante, la caractérisation de l'efficacité de la cure sur l'élément témoin réalisé au cours de l'épreuve de convenance, afin de valider cet aspect du protocole, peut s'appuyer sur des critères qualitatifs (aspect, compatibilité avec les spécifications de teinte et d'aspect des parements, absence de fissuration) et/ou quantitatifs (mesure in-situ de propriétés de transfert comme l'absorption d'eau).

En cours de production, l'efficacité des dispositions de cure appliquées selon le protocole doit faire l'objet d'un contrôle, conformément à la norme NF P 18-451.

L'actualisation éventuelle des dispositions permettant de garantir l'efficacité de la cure en cas de variation des conditions thermiques et hydriques ambiantes lors de la production et de la mise en place du BFUP doit faire l'objet d'un accord de l'utilisateur et du prescripteur sur la base de mesures actualisant celles de l'épreuve de convenance initiale, sans qu'il soit nécessaire de faire une nouvelle épreuve de convenance.

5.4.8 Traitements thermiques

Dans le présent document, on considère que le traitement thermique appliqué au BFUP frais, qui concerne les BFUP de type TT1 et les BFUP de type TT1+2, contribue à modifier significativement les propriétés finales à l'état durci, lorsque la résistance en compression moyenne mesurée après application de ce traitement thermique s'écarte de plus de 7 % de la résistance en compression moyenne, mesurée à la même échéance, du même BFUP qui n'aurait pas subi ce traitement thermique commencé dès avant la prise.

Le traitement thermique appliqué au BFUP frais ou durci et contribuant à modifier significativement ses propriétés finales à l'état durci, pour certains BFUP de type TT1 et pour les BFUP de type TT2 ou TT1+2, doit être mis au point lors de l'étude et caractérisé à l'issue de l'épreuve d'étude, ou doit avoir été caractérisé préalablement dans la carte d'identité du matériau, par le profil de température et de conditions hydriques en fonction du temps auxquelles est soumis l'élément en BFUP au cours de ce traitement. Il doit être notamment vérifié à ce stade que l'effet d'un tel traitement thermique permet de respecter les exigences du 4.3.3.

NF P 18-470

Le traitement thermique appliqué au BFUP dès les premières heures avant prise du matériau pour les BFUP de type TT1 ou TT1+2, qui n'a pour effet significatif que d'accélérer la prise et le durcissement sans modifier les propriétés finales du matériau, doit avoir fait l'objet d'une étude générique préalable permettant le recalage en temps équivalent pour le matériau considéré. Le traitement adapté aux éléments du projet doit faire l'objet d'une mise au point spécifique, et être validé à l'issue de l'épreuve de convenance. Il doit être caractérisé par le profil de température et de conditions hydriques en fonction du temps auxquelles est soumis l'élément en BFUP au cours de ce traitement.

Dans tous les cas la caractérisation du traitement thermique, qui porte sur les conditions d'environnement de la pièce, doit comprendre l'âge (ou l'âge équivalent) du matériau au début de l'application du traitement, la vitesse de montée en température jusqu'à l'atteinte d'un palier (température, durée d'application, tolérance sur ces grandeurs) et la vitesse de refroidissement jusqu'à température ambiante, et ce pour chaque type de traitement le cas échéant. La caractérisation doit comprendre également les conditions d'humidité relative lors de chaque traitement. Les âges doivent être exprimés à 15 min près lorsqu'ils sont inférieurs à 24 h, puis à l'heure près. Les températures doivent être exprimées au °C près et les humidités relatives exprimées en étant arrondies à 5 %.

Le(s) traitement(s) thermique(s) appliqué(s) lors de l'épreuve de convenance participe(nt) de la validation du choix du BFUP dans la mesure où il doit être vérifié que les performances spécifiées sont atteintes sur le BFUP traité. Il doit être également vérifié à ce stade que l'effet du traitement thermique permet de respecter les exigences du 4.3.3.

Lorsque le BFUP est soumis à un traitement thermique d'amplitude modérée appliqué pour anticiper le début de prise et accélérer la prise et le durcissement initial (parfois désigné sous les termes de « cure thermique », « étuvage » ou « accélération de l'hydratation par traitement thermique »), qui ne modifie les propriétés atteintes au jeune âge, en particulier la résistance, le retrait et le fluage, que par le paramétrage de la cinétique d'évolution de ces propriétés par l'âge équivalent du matériau, et conserve la valeur finale de ces propriétés, on doit s'assurer que les propriétés au jeune âge sont bien atteintes conformément au calcul.

NOTE 1 Le suivi maturométrique peut permettre, à partir du seul calibrage initial de montée en résistance, de s'assurer du respect de cette exigence.

Sauf justification spécifique, le traitement thermique de ce type qui concerne les BFUP de type TT1, et TT1+2 avant le traitement sur béton mature, doit être limité à une durée totale de 12 h et à une température maximale du béton de 60 °C.

Au contraire lorsque le traitement thermique modifie significativement certaines propriétés, en particulier la résistance et son évolution, les propriétés associées à la durabilité, le retrait et le fluage qui se développent après ce traitement thermique, ce qui concerne certains BFUP de type TT1 et les BFUP de type TT2, et TT1+2 après le traitement sur béton mature, cet effet doit avoir été caractérisé au stade de l'étude (ou dans la carte d'identité du matériau) pour une prise en compte appropriée dans le projet.

Le respect du protocole de traitement thermique doit être couvert par les dispositions du contrôle interne de l'utilisateur du BFUP, et doit faire l'objet d'un contrôle extérieur de la part du prescripteur. Le contrôle de l'application du protocole de traitement doit se traduire par un enregistrement de température et d'humidité sur l'ensemble de la durée du traitement.

Les modalités d'adaptation éventuelle des moyens permettant d'appliquer le traitement s'appliquant dès avant la prise et le durcissement aux conditions ambiantes de température doivent avoir été prévues par l'utilisateur de BFUP.

Lorsqu'il est prévu dans le processus de production, l'accompagnement du refroidissement d'une structure ou d'un élément en BFUP ne constitue pas une classe de traitement thermique et relève de la norme NF P 18-451. Sa mise au point est validée lors de l'épreuve de convenance.

NOTE 2 La caractérisation et le respect de l'application de ce processus d'accompagnement du refroidissement font l'objet de dispositions détaillées dans la norme NF P 18-451.

NF P 18-470

5.5 Exigences pour les BFUP durcis (usage structurel)

5.5.1 Généralités

Sauf spécification contraire, les propriétés exigées pour les BFUP durcis, y compris les propriétés associées à la résistance au feu et à la maîtrise de l'éclatement sous l'action du feu, doivent être mesurées sur des éprouvettes testées à 28 jours pour les BFUP de type STT ou TT1, ou après application du traitement thermique pour les BFUP de type TT2 ou TT1+2. Pour des utilisations particulières il peut s'avérer nécessaire de spécifier certaines propriétés à des échéances différentes qui doivent alors être précisées dans la spécification. Il peut notamment s'agir, pour les BFUP de type TT2 ou TT1+2, des propriétés nécessaires à justifier les phases d'exécution avant traitement thermique.

5.5.2 Résistance en compression

La détermination de la résistance en compression du BFUP doit être effectuée selon la norme NF EN 12390-3:2012 par des essais effectués sur des cylindres normalisés de 110 mm de diamètre et d'élancement 2, les éprouvettes satisfaisant aux normes NF EN 12390-1 et NF EN 12390-2. Les indications complémentaires sont données en Annexe C, en particulier pour l'utilisation de corps d'épreuve d'autres forme ou dimensions.

La résistance moyenne, utilisée pour la détermination conventionnelle de la déformation ultime de calcul en compression et pour celle du comportement de calcul pour l'analyse structurale non linéaire, selon les indications données dans la norme NF P 18-710:2016, doit être issue de l'épreuve d'étude ou de la carte d'identité du matériau.

La détermination expérimentale de la résistance caractéristique doit s'effectuer selon l'Annexe B.

La résistance caractéristique du BFUP doit être égale ou supérieure à la valeur de résistance caractéristique minimale de la classe spécifiée pour le projet (voir Tableau 5). Elle doit en outre être égale ou supérieure à la résistance caractéristique minimale de la classe de résistance à laquelle le BFUP appartient (voir Tableau 5), sans excéder cette résistance caractéristique minimale augmentée de 40 MPa.

NOTE Il y a lieu de distinguer la valeur caractéristique minimale spécifiée pour le projet de la résistance caractéristique minimale du BFUP retenu.

5.5.3 Masse volumique

La masse volumique sèche du BFUP doit être déterminée conformément à la norme NF EN 12390-7 après séchage à l'étuve, avec les précisions suivantes :

- a) il est admis d'utiliser des éprouvettes rectifiées ;
- b) le volume minimal de l'échantillon est ramené à 0,5 litres ;
- c) le résultat est la moyenne obtenue sur un minimum de 3 éprouvettes.

La valeur moyenne de masse volumique doit respecter strictement les valeurs limites de classe données en 4.4.2. Une tolérance de -100 kg/m^3 par rapport à la valeur limite inférieure et de $+100 \text{ kg/m}^3$ par rapport à la valeur limite supérieure est admise pour chaque résultat individuel. Lorsque, dans des cas particuliers, la masse volumique est spécifiée en termes de valeur cible, une tolérance de $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ est appliquée sur les résultats individuels et une tolérance de $\pm 50 \text{ kg/m}^3$ est appliquée sur la valeur moyenne. Toutefois, la moyenne des résultats expérimentaux de la détermination de la masse volumique d'un BFUP ne doit pas être strictement inférieure à $2\,200 \text{ kg/m}^3$ ni strictement supérieure à $2\,800 \text{ kg/m}^3$ pour respecter la classe normale de masse volumique (voir 4.4.2).

Pour certains BFUP comportant des fibres organiques, les modalités de séchage peuvent devoir être adaptées, elles doivent alors être décrites dans le rapport d'essais. Par ailleurs, la masse volumique peut faire l'objet de mesures dans des conditions différentes de contrôle de l'humidité. Ces conditions doivent alors être spécifiées et renseignées dans le rapport d'essais.

5.5.4 Comportement en traction

Le comportement en traction du BFUP doit être mesuré et analysé conformément à l'Annexe D (essais sur prismes) ou à l'Annexe E (essais sur plaques minces) selon la géométrie des éléments du projet. Les facteurs d'orientation K traduisant l'effet de la distribution et de l'orientation des fibres, dans la partie d'ouvrage et la direction considérées, doivent être déterminés conformément à l'Annexe F.

Le comportement en traction du BFUP doit faire l'objet d'une spécification comprenant les trois éléments suivants :

- a) la classe de comportement en traction (voir 4.4.3) ;
- b) la donnée d'une courbe de réponse du matériau en traction, vis-à-vis de laquelle sera comparée l'estimation expérimentale de la courbe caractéristique de comportement déterminée sur éprouvettes moulées, correspondant à des valeurs spécifiées de contraintes arrondies à 0,1 MPa près. Les valeurs caractéristiques de la limite d'élasticité et de la résistance post-fissuration doivent être données explicitement ;

NOTE Dans le cas de l'utilisation des lois conventionnelles décrites en 3.1.7.3.2 et 3.1.7.3.3 de la norme NF P 18-710:2016, la spécification revient à la donnée des paramètres cités dans ces paragraphes (limite d'élasticité, résistance post-fissuration, ouverture de fissure correspondant au pic local ou à 0,3 mm s'il n'y a pas de pic et contrainte correspondantes, ouverture de fissure égale à 1 % de la hauteur du prisme d'essai et contrainte correspondante etc.) décrivant le comportement caractéristique en traction. Dans le cas où les lois conventionnelles ne sont pas utilisées, la spécification revient à un jeu de valeurs caractéristiques de contrainte maximale et de valeurs décrivant le comportement caractéristique en traction.

- c) la donnée d'un jeu de facteurs d'orientation K_{global} et K_{local} , dans les différentes parties d'ouvrages et directions faisant l'objet d'une vérification mobilisant la contribution du BFUP en traction. Les courbes obtenues par application de ces facteurs d'orientation à la courbe de réponse ci-dessus conformément à l'Annexe F, représentent le comportement en traction servant de référence au calcul de l'ouvrage, conformément à la norme NF P 18-710:2016, avant application le cas échéant du coefficient partiel relatif au BFUP tendu γ_{cf} .

La valeur moyenne de la résistance post-fissuration, utilisée notamment pour la détermination conventionnelle des longueurs d'ancrage et de recouvrement et de la loi de calcul du comportement en compression pour l'analyse non linéaire selon les indications données dans la norme NF P 18-710:2016, doit être issue de l'épreuve d'étude ou de la carte d'identité du matériau. Elle doit être déterminée conformément à l'Annexe D (essais sur prismes) ou à l'Annexe E (essais sur plaques minces) selon la géométrie des éléments du projet.

5.5.5 Réaction au feu

Les BFUP conformes au présent document sont classés A1 selon la norme NF EN 13501-1+A1 et ne requièrent pas d'essais⁴⁾ s'ils présentent moins de 1 % en poids ou en volume (selon la valeur la plus faible) de matériau organique répartie de manière homogène. Dans le cas contraire leur classement pourra être effectué sur la base d'essais conformément à la norme NF EN 13501-1+A1.

4) Selon l'arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction, traduisant la décision de la Commission Européenne du 9 septembre 1994 (94/611/CE) publiée au Journal Officiel des Communautés Européennes N° L 241/25, du 9 septembre 1994.

NF P 18-470

5.5.6 Propriétés physiques et mécaniques à haute température

La norme NF P 18-710:2016 décrit les justifications nécessaires permettant d'assurer la stabilité au feu d'un ouvrage en BFUP, par essai à l'échelle 1 ou par modélisation thermomécanique.

La justification par le calcul nécessite la connaissance de propriétés physiques et mécaniques fonctions de la température : conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique, dilatation thermique, module d'Young, résistance en traction et résistance en compression, et éventuellement déformation thermique transitoire.

Les évolutions de la masse volumique, de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique avec la température doivent être déduites de la norme NF EN 1992-1-2 avec les précisions suivantes :

- a) évolution de la masse volumique par référence au 3.3.2 (3) de cette norme ;
- b) chaleur spécifique par référence au 3.3.2 (1) de cette norme ;
- c) conductivité thermique par référence au 6.3.1 (1) de la norme NF EN 1992-1-2/NA:2007.

Pour le BFUP considéré, la dilatation thermique et l'évolution avec la température du module d'Young, du comportement en traction et de la résistance en compression doivent être déterminées expérimentalement en éprouvette d'étude ou dans la carte d'identité du matériau. Cette détermination doit se faire sur éprouvettes non protégées de la dessiccation, jusqu'à la température maximale atteinte dans l'ouvrage au cours du scénario considéré, et au moins jusqu'à 600 °C.

Les méthodes à utiliser, pour l'essentiel issues des recommandations du comité technique de la RILEM « *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures* », et introduites dans leur ensemble par la recommandation RILEM partie 1 [7], sont les suivantes :

- a) évolution de la résistance en compression : recommandation RILEM Partie 3 [8] avec détermination à chaud sur 3 éprouvettes au moins, conformes à l'Annexe C à l'exception de leur élancement égal à 3, portées à température avant application du chargement. Le résultat de chacune des éprouvettes ne doit pas s'écarter de plus de 10 % de la moyenne ; la valeur retenue est la plus faible des résistances individuelles ;
- b) évolution du module d'Young : recommandation RILEM Partie 5 [9] avec détermination à chaud sur 3 éprouvettes au moins, conformes à l'Annexe C à l'exception de leur élancement égal à 3, portées à température avant application du chargement. Le résultat de chacune des éprouvettes ne doit pas s'écarter de plus de 20 % de la moyenne ; la valeur retenue est la moyenne des déterminations ;
- c) dilatation thermique : détermination selon la recommandation RILEM Partie 6 [10] sur éprouvettes conformes à l'Annexe C, le résultat est obtenu comme la courbe moyenne de 2 éprouvettes. L'écart quadratique moyen par rapport à la courbe moyenne doit être inférieur à 20 % ;
- d) comportement en traction : détermination à chaud du comportement par un essai de flexion réalisé sur 3 éprouvettes, portées à température (conformément aux dispositions du 6.3.2 de la recommandation [8]) avant application du chargement, l'essai et l'analyse étant réalisés conformément à l'Annexe D ou à l'Annexe E selon l'épaisseur de l'élément. Le moment maximal de chacune des 3 éprouvettes ne doit pas s'écarter de plus de 20 % de la moyenne ; la courbe retenue est celle qui correspond au moment résistant le plus faible.

NF P 18-470

Si cette donnée est nécessaire dans le cadre d'un modèle de calcul au feu avancé, la déformation thermique transitoire doit être déterminée en compression selon la recommandation RILEM Partie 7 [11] sur éprouvettes conformes à l'Annexe C, non protégées de la dessiccation, soumises à une compression égale à 30 % de la résistance caractéristique, jusqu'à la température maximale atteinte dans l'ouvrage au cours du scénario considéré, et au moins jusqu'à 600 °C. Le résultat est obtenu comme la courbe moyenne de 2 éprouvettes. L'écart entre les deux courbes doit être inférieur à 4 mm/m pour des températures inférieures ou égales à 300 °C.

5.5.7 Maîtrise de l'éclatement sous l'action du feu

Lorsque l'action du feu est à prendre en compte dans le projet selon un scénario donné, la maîtrise du risque d'éclatement du BFUP dans les ouvrages ou composants exposés doit être vérifiée conformément à la norme NF P 18-710:2016.

La sensibilité à l'éclatement des BFUP sous l'action du feu est conditionnée par la composition du BFUP mais ne constitue pas une propriété intrinsèque du matériau. Elle doit être quantifiée expérimentalement sur un élément ou composant représentatif (en géométrie et en charge) de la structure réelle vis-à-vis du scénario de feu considéré.

L'incorporation d'une teneur suffisante en fibres de polypropylène permet généralement de diminuer voire d'annuler la sensibilité du BFUP à l'éclatement lorsqu'il est soumis au feu.

5.5.8 Module d'Young

Le module d'Young des BFUP ne se déduit pas simplement de leur résistance en compression. La norme NF P 18-710:2016 donne des précisions sur la valeur du module d'Young à utiliser pour le calcul.

Lorsque le module d'Young du BFUP doit être déterminé, il doit être mesuré conformément à l'Annexe C. La valeur issue de cette détermination est la moyenne des résultats d'au moins 3 éprouvettes, arrondie au gigapascal.

Lorsqu'elle est spécifiée, la valeur du module d'Young doit l'être sous forme de valeur cible. La valeur expérimentale moyenne obtenue doit respecter cette valeur cible avec une tolérance de $\pm 5 \%$ et la tolérance relative sur chaque résultat individuel est de $\pm 10 \%$ par rapport à la valeur cible.

5.5.9 Déformation à rupture en compression simple

Pour le calcul, la déformation à rupture en compression simple du BFUP s'obtient conventionnellement selon les indications du 3.1.7.2 de la norme NF P 18-710:2016, et ne fait pas l'objet d'une exigence spécifiée.

Pour le calcul, le comportement en compression pour l'analyse structurale non linéaire s'obtient conventionnellement selon les indications du 3.1.7.2 de la norme NF P 18-710:2016, et ne fait pas l'objet d'une exigence spécifiée.

5.5.10 Retrait**5.5.10.1 Généralités**

Le retrait des BFUP ne se déduit pas simplement de leur résistance en compression, il se développe rapidement dès la prise et son amplitude nécessite généralement de prendre des précautions en termes de méthodes constructives. Sous réserve d'une cure adéquate depuis la fin de la mise en œuvre et pendant la prise, le retrait des BFUP est principalement endogène. Pour un BFUP de type TT1 ou TT1+2, une partie du retrait s'effectue pendant l'étuvage. Pour un BFUP de type TT2 ou TT1+2, on peut admettre que la totalité du retrait a eu lieu à la fin du traitement thermique.

NF P 18-470

5.5.10.2 Amplitude du retrait total

L'amplitude du retrait total effectué entre le début de prise et 90 jours constitue une information synthétique, consignée notamment dans la carte d'identité du BFUP le cas échéant. Les conditions de référence de sa détermination sont les suivantes :

- sauf en cas d'applications de traitements thermiques, cure pendant 24 h ;
- conservation ultérieure à (20 ± 2) °C et (50 ± 5) % d'humidité relative ;
- mesure des déformations de l'éprouvette selon sa plus grande dimension, sur une base de mesure au minimum deux fois plus longue que la plus grande dimension transversale ;
- correction des déformations mesurées pour déduire les éventuels retraits / dilatations thermiques ;
- déclenchement des mesures au plus tard dès lors que le temps de début de prise mesuré selon la norme NF EN 480-2, sur le BFUP non modifié, est atteint, ou que la vitesse des ondes ultrasonores n'excède pas 2 500 m/s.

Cette amplitude du retrait total effectué entre le début de prise et 90 jours peut constituer une exigence spécifiée. Dans ce cas, en l'absence de méthode normalisée disponible ou adaptée, les détails complémentaires du mode opératoire de sa détermination et les critères d'acceptation doivent être définis d'un commun accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur. Il est recommandé de spécifier cette exigence sous forme de valeur cible et de lui associer une tolérance sur la valeur expérimentale obtenue, typiquement de ± 10 % de cette valeur cible.

NOTE La détermination expérimentale de l'évolution du retrait du BFUP peut fournir une donnée utile pour maîtriser les effets de déformations gênées au jeune âge, et appliquer le cas échéant le 2.3.3 et le V.1 de la norme NF P 18-710:2016. Pour une meilleure représentativité ou utilisation dans le calcul les conditions d'essai peuvent être adaptées, d'un commun accord entre les parties concernées.

5.5.10.3 Détermination en vue du calcul

Lorsque la question est pertinente pour l'élément en BFUP considéré, la norme NF P 18-710:2016 donne des précisions sur la loi de retrait à utiliser pour le calcul et la maîtrise des effets du retrait éventuellement combinés aux autres déformations et chargements imposés.

L'évolution du retrait peut alors être décrite en utilisant les modèles de l'Annexe B de la norme NF EN 1992-2:2006, moyennant une calibration des amplitudes et coefficients liés à la cinétique en application du B.104 de la norme NF EN 1992-2:2006. Pour les BFUP de type TT1 ou TT1+2, cette évolution doit être exprimée en temps équivalent en particulier au jeune âge lors du traitement thermique. La calibration consiste à ajuster les coefficients en minimisant l'erreur quadratique par rapport à la moyenne du résultat expérimental. Le coefficient d'amplitude est arrondi à 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ près.

5.5.10.4 Maîtrise des effets du retrait

En fonction du projet, d'autres modes opératoires permettant de caractériser le retrait ou ses effets, sans lien nécessaire avec une justification par le calcul, peuvent être déterminés d'un commun accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur. Ces modes opératoires doivent notamment préciser la géométrie des corps d'épreuve utilisés, la durée et les conditions de l'essai, ainsi que les conditions d'exploitation de l'essai et d'interprétation des résultats en lien avec les exigences associées.

5.5.11 Fluage

5.5.11.1 Généralités

Le fluage des BFUP ne se déduit pas simplement de leur résistance en compression. Pour des chargements appliqués sur un BFUP de maturité suffisante, le fluage de dessiccation est très faible et le fluage propre est inférieur à celui des BTHP. Pour un BFUP de type TT2 ou TT1+2, on peut admettre que le fluage est presque inexistant pour les charges appliquées après le traitement thermique.

5.5.11.2 Détermination en vue du calcul

Lorsque la question est pertinente pour l'élément en BFUP considéré, la norme NF P 18-710:2016 donne des précisions sur la loi de fluage à utiliser pour le calcul et la maîtrise des effets du fluage éventuellement combinés aux autres déformations et chargements imposés.

Il convient de décrire le développement du fluage en utilisant les modèles de l'Annexe B de la norme NF EN 1992-2:2006, moyennant une calibration des amplitudes et coefficients liés à la cinétique en application du B.104 de la norme NF EN 1992-2:2006. Pour cette calibration, les conditions de référence sont de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ pour la détermination expérimentale de l'évolution du fluage (fluage propre ou fluage total), et de $(50 \pm 5) \%$ d'humidité relative pour la détermination du fluage de dessiccation. Pour les BFUP de type TT1 ou TT1+2, cette évolution doit être exprimée en temps équivalent, en particulier au jeune âge lors du traitement thermique. La calibration consiste à ajuster les coefficients en minimisant l'erreur quadratique par rapport à la moyenne du résultat expérimental. Le coefficient d'amplitude du fluage spécifique est arrondi à $1 \mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ près.

Lorsque le fluage du BFUP doit être déterminé expérimentalement, les précautions appropriées doivent être adoptées, aussi bien pour la conduite de l'essai que pour son interprétation, lorsque le chargement a lieu alors que le BFUP est encore en phase évolutive rapide de sa résistance.

En fonction du projet, les coefficients de fluage du BFUP à des âges représentatifs de l'application des charges pourront constituer une exigence spécifiée. En l'absence de méthode normalisée disponible ou adaptée, les détails du mode opératoire de sa détermination et les conditions d'acceptation doivent être définis d'un commun accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur. Il est recommandé de spécifier cette exigence sous forme de valeur cible, et d'adopter une tolérance sur la valeur expérimentale obtenue de $\pm 0,1$.

5.5.11.3 Maîtrise des effets du fluage

En fonction du projet, d'autres modes opératoires permettant de caractériser le fluage ou ses effets, sans lien nécessaire avec une justification par le calcul, peuvent être déterminés d'un commun accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur. Ces modes opératoires doivent notamment préciser la géométrie des corps d'épreuve utilisés, la durée et les conditions de l'essai, ainsi que les conditions d'exploitation de l'essai et d'interprétation des résultats en lien avec les exigences associées. Notamment, si la maîtrise des effets du fluage du BFUP n'est pas démontrée par le calcul en application de la norme NF P 18-710:2016, le cas échéant parce que le BFUP utilisé n'est pas couvert par cette norme, la maîtrise des effets du fluage du BFUP doit être démontrée expérimentalement pour les éléments ou structures en BFUP précontraint.

5.5.12 Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique des BFUP varie suivant le matériau employé. La norme NF P 18-710:2016 donne des précisions sur la valeur du coefficient de dilatation thermique à utiliser pour le calcul.

Lorsque le coefficient de dilatation thermique du BFUP doit être déterminé, il doit être mesuré conformément à la norme NF EN 1770. Il est exprimé à $0,5 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ près.

La valeur du coefficient de dilatation thermique peut être spécifiée, sachant qu'elle pourra typiquement varier selon le BFUP utilisé de $8 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ à $14 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. La tolérance sur la valeur expérimentale obtenue est de $\pm 1 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$.

NF P 18-470

5.6 Carte d'identité

5.6.1 Informations associées à la désignation

La carte d'identité doit comprendre une désignation dénuée d'ambiguïté correspondant à l'ensemble des exigences de moyens qui permettent d'obtenir de façon reproductible les propriétés annoncées (exigences spécifiées ou susceptibles de l'être) :

- a) formule nominale du BFUP (désignation, proportion, tolérances, D_{sup}), comprenant le cas échéant un constituant pré-mélangé ;
- b) principes généraux du processus de malaxage ;
- c) application d'un traitement thermique et description de ce traitement lorsque ce dernier influence les propriétés à l'état durci (certains BFUP de type TT1, BFUP de type TT2 ou TT1+2) ;
- d) conformité au présent document, classification (notamment lié au type de fibres contribuant à assurer la non-fragilité) et désignation.

5.6.2 Exigences minimales

La carte d'identité doit comprendre au minimum les exigences suivantes, telles que définies en 5.3, 5.4 et 5.5, qui doivent avoir été mesurées ou vérifiées depuis moins de 2 ans sauf le retrait et la porosité (moins de 5 ans) et le coefficient de dilatation thermique (moins de 10 ans) :

- a) consistance et durée pratique d'utilisation ;
- b) résistance caractéristique en compression (à 28 jours pour les BFUP de type STT et TT1, avant et après traitement thermique post-prise pour les BFUP de type TT2 et TT1+2) ;
- c) contrainte maximale et valeurs décrivant le comportement caractéristique en traction (à 28 jours pour les BFUP de type STT et TT1, avant et après traitement thermique post-prise pour les BFUP de type TT2 et TT1+2) et classe de comportement en traction, par référence à un emploi donné associé à un procédé de mise en œuvre et à un coefficient K ;
- d) module d'Young ;
- e) masse volumique ;
- f) teneur en air ;
- g) porosité à l'eau, mesurée à 90 jours ;
- h) coefficient de diffusion apparent des ions chlore ;
- i) perméabilité aux gaz ;
- j) coefficient de dilatation thermique ;
- k) amplitude du retrait total comme défini en 5.5.10.

5.6.3 Propriétés complémentaires

La carte d'identité d'un BFUP peut comprendre des propriétés complémentaires, faisant partie des exigences décrites en 5.3, 5.4 et 5.5, ou permettant d'obtenir des données de calcul pour une justification selon la norme NF P 18-710:2016, à l'initiative du producteur, notamment pour répondre à un ensemble plus complet d'exigences spécifiées, en particulier :

- a) contrainte maximale et valeurs décrivant le comportement caractéristique en traction (à 28 jours pour les BFUP de type STT et TT1, avant et après traitement thermique post-prise pour les BFUP de type TT2 et TT1+2) et classe de comportement en traction (par référence à d'autres emplois donnés, notamment d'épaisseurs différentes, associés aux procédés de mise en œuvre adoptés et aux coefficients K obtenus) ;
- b) caractéristiques liées au retrait (5.5.10) et au fluage (5.5.11) ;
- c) classe correspondant à la réaction au feu, éventuelles données caractérisant la résistance à l'instabilité thermique, paramètres associés au calcul de résistance au feu ;
- d) résistance à l'abrasion ;
- e) résistance moyenne à la compression ;
- f) contrainte maximale moyenne post-fissuration ;
- g) caractéristiques décrivant le comportement à haute vitesse de sollicitation.

Le producteur doit fournir au prescripteur, si ce dernier en fait la demande, le détail de la détermination des valeurs données dans la carte d'identité du BFUP (rapports d'essais, relevés d'autocontrôle, dispersion...).

6 Spécification du BFUP

6.1 Généralités

Pour la réalisation d'un projet donné, le prescripteur du BFUP doit s'assurer que toutes les exigences pertinentes relatives aux propriétés requises du BFUP sont incluses dans la spécification donnée au producteur. Le prescripteur doit également spécifier toutes les exigences relatives aux propriétés du BFUP qui sont nécessaires à son transport (avant et après livraison), à sa mise en place, ou à tout autre traitement ultérieur, et les exigences particulières liées par exemple à l'aspect de parement attendu.

Pour ce faire le prescripteur doit prendre en compte :

- a) l'utilisation du BFUP frais et durci ;
- b) les conditions de cure et de maturation ;
- c) les dimensions de la structure (développement de la chaleur) ;
- d) les agressions environnementales et les conditions de service auxquelles la structure sera exposée, en lien avec la durabilité attendue ;
- e) toutes exigences sur l'aspect des parements et la finition des surfaces ;
- f) toutes les exigences liées à l'épaisseur des sections, à l'enrobage des éventuelles armatures, et aux conditions de mise en place du BFUP.

NF P 18-470

Le BFUP est spécifié comme un BFUP à propriétés spécifiées (voir 3.1.1.3), l'obtention de ces propriétés par le choix d'un BFUP donné étant issue d'une expérience consolidée dans la carte d'identité du matériau, ou résultant d'une épreuve d'étude. La vérification de l'obtention effective des propriétés dans les conditions du projet fait l'objet de l'épreuve de convenance.

6.2 Spécifications de base

La spécification du BFUP pour un projet donné doit comprendre :

- a) la conformité au présent document ;
- b) la classe de résistance à la compression ;
- c) la classe associée au type de fibres contribuant à assurer la non-fragilité ;
- d) la valeur cible de consistance, ou à défaut la classe de consistance (cette indication de consistance étant dans tous les cas associée à une durée pratique d'utilisation) ;
- e) la classe de traitement thermique et les paramètres de contrôle associés au(x) traitement(s) le cas échéant ;
- f) le comportement en traction décrit conformément au 5.5.4 par la classe de comportement en traction du BFUP, la courbe de réponse en traction du matériau, et le jeu de facteurs d'orientation adapté à l'ouvrage considéré ;
- g) l'indication des classes d'exposition s'appliquant aux parties d'ouvrage concernées ;
- h) la durée d'utilisation du projet.

6.3 Exigences complémentaires

En fonction de la nature et des besoins du projet, la spécification du BFUP peut devoir comprendre les autres données suivantes liées au matériau ou à l'élément d'ouvrage considéré :

- a) en cas d'exposition XA1, XA2 ou XA3, les données liées aux agressions chimiques nécessaires au respect des exigences liées à la durabilité ;
- b) la caractérisation de l'exposition à l'incendie à prendre en compte dans le projet, la durée de résistance et le type de comportement au feu attendus pour l'élément en BFUP ;
- c) la classe de résistance à l'abrasion ;
- d) si nécessaire compte tenu de la durée d'utilisation de projet, la ou les classes de résistance aux transferts ;
- e) le cas échéant, la dimension maximale des granulats.

En fonction des besoins du projet, les propriétés suivantes peuvent faire l'objet de spécifications sous forme de performances associées à l'atteinte de valeurs seuils ou cibles selon des procédés de mesure ou par application de méthodes d'essais spécifiées. Pour ces exigences les modalités de vérification d'atteinte de ces exigences, et notamment la fréquence des épreuves de contrôle, doivent être précisées dans la spécification suivant la nature et les besoins du projet :

- a) caractéristiques additionnelles associées à la consistance du BFUP frais (si nécessaire pour préciser la spécification par classes ou valeur cible) ;
- b) caractéristiques associées au développement de la résistance, par exemple résistance à une échéance précoce (associée au décoffrage ou à l'application de la précontrainte) ;

- c) masse volumique ;
- d) coefficient de dilatation thermique ;
- e) module d'Young ;
- f) coefficient de Poisson ;
- g) caractéristiques de retrait (voir 5.5.10) ;
- h) caractéristiques liées au fluage (voir 5.5.11) ;
- i) caractérisation du comportement dynamique, résistance au choc ;
- j) température du BFUP frais ;
- k) teneur en air du BFUP frais ;
- l) exigences performantielles portant sur le matériau BFUP liées à l'aspect de parement, suivant le référentiel détaillé dans le fascicule de documentation FD P 18-503 ;
- m) porosité à l'eau ;
- n) coefficient de diffusion des ions chlorure ;
- o) perméabilité aux gaz ;
- p) absorption capillaire ;
- q) caractérisation de la résistance à des attaques chimiques (lixiviation, attaque acide, ...).

En fonction des besoins du projet, d'autres exigences peuvent être spécifiées sous forme de performances associées à l'atteinte de valeurs seuils ou cibles selon des procédés de mesure ou par application de méthodes d'essais qu'il sera nécessaire de préciser.

Même si l'expression performantielle des exigences doit être privilégiée dans la spécification des BFUP, des exigences complémentaires peuvent porter sur l'exclusion ou l'utilisation obligatoire d'une source ou d'un type particulier de constituant. Dans ce cas le prescripteur doit assurer la compatibilité de son utilisation avec la spécification du BFUP.

Des exigences complémentaires de moyens ou de performances, portant toujours sur le matériau ou ses constituants, peuvent être associées au processus de fabrication, transport, mise en œuvre et traitement lors de la maturation du BFUP afin d'obtenir les propriétés requises. Des exigences complémentaires portant sur le matériau peuvent par exemple aussi être associées à la prévention de la corrosion de fibres débouchant en surface, à l'application de traitements de surface ou à l'obtention d'un aspect de parement ouvragé. Dans tous ces cas le prescripteur doit assurer la compatibilité des modalités prescrites avec la spécification du BFUP.

Les Articles 7 à 10 précisent les modalités de vérification d'atteinte des exigences de 6.2 et de 6.3 lors de l'épreuve d'étude, lors de l'épreuve de convenance, et en épreuve de contrôle au cours de la production.

NF P 18-470

7 Épreuves d'étude et de convenance

7.1 Généralités

L'épreuve d'étude, exécutée par le producteur du BFUP et sous sa responsabilité, consiste à vérifier que la formule de BFUP permet de satisfaire les spécifications du projet en tenant compte des tolérances de fabrication. À cet effet, le producteur peut le cas échéant s'appuyer sur l'existence d'une carte d'identité permettant de répondre à tout ou partie des spécifications. En l'absence de carte d'identité ou d'informations adaptées dans la carte d'identité, il doit réaliser une épreuve d'étude comprenant la détermination des propriétés spécifiées non étudiées préalablement.

Le producteur du BFUP doit réaliser ensuite une épreuve de convenance afin que le prescripteur puisse valider l'utilisation de la formule de BFUP proposée compte tenu des moyens de fabrication, transport, mise en place, cure et traitements éventuels prévus dans les procédures de production. L'épreuve de convenance doit comprendre également la réalisation d'un élément témoin, effectuée sous la responsabilité de l'utilisateur du BFUP frais, permettant la validation de l'ensemble des procédures de production, notamment des modalités de mise en place, de cure et traitements thermiques éventuels, par l'atteinte des performances spécifiées.

7.2 Épreuve d'étude

7.2.1 Contenu de l'épreuve d'étude

L'épreuve d'étude doit porter sur l'ensemble des propriétés du BFUP spécifiées pour le projet donné, comme détaillé à l'Article 6. Elle consiste à valider l'atteinte des performances par la formule nominale, et à vérifier que cette formule nominale reste robuste si les proportions des constituants atteignent les valeurs limites tolérées, cette robustesse s'appréciant vis-à-vis de la résistance en compression et en traction, et de la consistance. Cette validation doit intégrer l'application des traitements thermiques éventuellement prévus.

À cet effet l'épreuve d'étude doit porter sur les gâchées suivantes :

- a) une gâchée selon la formule nominale ;
- b) une gâchée selon la dérivée solide pour laquelle on ajoute une quantité de liant égale à une fois la tolérance pondérale et on retranche une quantité d'eau d'apport égale à une fois la tolérance pondérale ;
- c) une gâchée selon la dérivée liquide pour laquelle on ajoute une quantité d'eau d'apport égale à une fois la tolérance pondérale et on retranche une quantité de liant égale à une fois la tolérance pondérale.

Chaque gâchée doit donner lieu à un prélèvement à partir duquel sont effectués les essais correspondant aux spécifications de base :

- a) un essai de consistance adapté à l'ouvrabilité du béton, associé à la mesure de température du béton frais ;
- b) une détermination de la durée pratique d'utilisation du BFUP par mesure régulière de la consistance au cours du temps selon l'essai adapté à l'ouvrabilité du béton, complétée éventuellement par des mesures à une température représentative des conditions prévisibles de mise en œuvre ;
- c) un essai de détermination de la résistance à la compression (mesurée sur au moins trois éprouvettes) selon l'Annexe C ;
- d) un essai de détermination du comportement en traction selon l'Annexe D ou l'Annexe E.

NF P 18-470

La gâchée correspondant à la formule nominale doit permettre d'effectuer les prélèvements nécessaires à la réalisation des autres essais suivants :

- ceux correspondant à la vérification de la conformité du présent document (porosité à l'eau, coefficient de diffusion des ions chlorure, perméabilité apparente aux gaz, masse volumique, respect des exigences du 4.3.3 concernant le traitement thermique éventuellement appliqué) ;
- ceux correspondant aux exigences complémentaires par référence au 6.3 et la détermination de l'énergie d'activation du BFUP permettant ultérieurement le recalage en temps équivalent.

7.2.2 Critères d'acceptation de l'épreuve d'étude

7.2.2.1 Généralités

L'épreuve d'étude est considérée comme probante si les conditions suivantes sont toutes remplies :

- a) les résultats des essais de porosité à l'eau, coefficient de diffusion des ions chlore, perméabilité apparente aux gaz, masse volumique sont tous conformes aux exigences décrites en 4.2.2 et 4.4.2 ;
- b) dans le cas où un traitement thermique est appliqué, les exigences du 4.3.3 sont satisfaites ;
- c) les résultats des essais correspondant aux exigences complémentaires sont tous conformes aux spécifications ;
- d) tous les résultats de consistance (mesurés dans l'intervalle correspondant à la durée pratique d'utilisation) sont conformes à la classe spécifiée, ou se trouvent dans la plage spécifiée relative à la valeur cible de consistance, dans les conditions de température conformes au 5.2.10, pour la formule nominale et les dérivées ;
- e) les résultats des essais de compression et de traction, pour la formule nominale et les dérivées, vérifient les exigences décrites en 7.2.2.2 et 7.2.2.3.

7.2.2.2 Critères d'acceptation des résultats d'essais de résistance à la compression

D'une part :

La moyenne arithmétique ($f_{cm,n}$) des résultats de la gâchée répondant à la formule nominale doit satisfaire les inégalités (2) et (3) suivantes :

$$f_{cm,n} \geq f_{ck,req} + C_E - (C_{moy} - 3S_c) + 3 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$f_{cm,n} \geq 1,1 f_{ck,req} \quad (3)$$

D'autre part :

Pour chacune des gâchées dérivées, la moyenne des résultats de résistance à la compression doit satisfaire les inégalités (4) et (5) suivantes :

$$f_{cm,d} \geq f_{ck,req} + C_E - (C_{moy} - S_c) \quad (4)$$

$$f_{cm,d} \geq 1,05 f_{ck,req} \quad (5)$$

Dans ces inégalités, les valeurs étant exprimées en MPa :

- $f_{cm,n}$ est la moyenne arithmétique des résultats de résistance à la compression effectués sur la gâchée nominale ;
- $f_{cm,d}$ est le résultat moyen de résistance à la compression obtenu sur une gâchée dérivée ;

NF P 18-470

- $f_{ck,req}$ est la valeur caractéristique requise de la résistance à la compression ;
- C_E est la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'épreuve d'étude, déterminée selon la norme NF EN 196-1 ;
- C_{moy} est la valeur moyenne de la résistance à la compression à 28 jours du ciment, déterminée selon la norme NF EN 196-1, observée par le fournisseur au cours des six mois précédant l'épreuve d'étude ;
- S_c est l'écart type des valeurs utilisées pour déterminer C_{moy} .

7.2.2.3 Critères d'acceptation des résultats des essais de résistance à la traction

Pour chacune des gâchées dérivées et pour la gâchée répondant à la formule nominale, l'estimation de la valeur caractéristique de la limite d'élasticité $f_{ctk,el}$ issue des essais de flexion 4 points doit être supérieure ou égale à la valeur requise $f_{ctk,el,req}$.

Pour chacune des gâchées dérivées et pour la gâchée répondant à la formule nominale, l'estimation de la courbe caractéristique du comportement en traction déterminée selon l'Annexe D ou E doit être supérieure ou égale en tout point à la loi requise par référence au 6.2.

Pour chacune des gâchées dérivées et pour la gâchée répondant à la formule nominale, le BFUP doit appartenir à la classe de comportement en traction spécifiée, ou à une classe supérieure.

7.3 Épreuve de convenance

7.3.1 Contenu de l'épreuve de convenance

7.3.1.1 Propriétés à vérifier

L'épreuve de convenance doit dans tous les cas porter sur les propriétés du BFUP suivantes :

- a) la consistance, déterminée selon l'essai adapté à l'ouvrabilité du BFUP, associée à la mesure de température du BFUP frais ;
- b) la durée pratique d'utilisation du BFUP, déterminée par mesure régulière de la consistance au cours du temps selon l'essai adapté à l'ouvrabilité du béton, complétée éventuellement par des mesures à une température représentative des conditions prévisibles de mise en œuvre ;
- c) la résistance à la compression (déterminée par application de l'Annexe C) ;
- d) le comportement en traction (déterminé par application de l'Annexe D ou de l'Annexe E).

Lorsque les propriétés suivantes sont spécifiées pour le projet donné, l'épreuve de convenance doit en outre porter sur :

- a) la teneur en air du BFUP frais ;
- b) les caractéristiques additionnelles éventuelles associées à la consistance du BFUP frais en lien avec les modalités de sa mise en place ;
- c) le module d'Young ;
- d) le développement de la résistance (caractérisé, par exemple, par des valeurs à des échéances précoces par référence aux besoins associés à des opérations de décoffrage, manutention, mise en précontrainte ou traitement thermique).

NF P 18-470

Les prélèvements, permettant de valider l'atteinte des performances spécifiées par la formule nominale, doivent être réalisés sur une charge de BFUP représentative, produite dans les conditions prévues et en application des procédures de production à valider (malaxage, production d'un volume représentatif, transport, mise en place et traitements éventuels). Il doit être réalisé un prélèvement au début et à la fin de la mise en œuvre de la charge. Chaque prélèvement doit permettre de réaliser la détermination des propriétés spécifiées sur BFUP frais et de fabriquer la moitié des éprouvettes nécessaires aux essais sur BFUP durci.

Le nombre minimum d'éprouvettes fabriquées au total pour la vérification des propriétés à mesurer systématiquement doit être de :

- 6 éprouvettes pour la détermination de la résistance en compression selon l'Annexe C ;
- 12 prismes pour la détermination du comportement en traction en application de l'Annexe D, ou 4 plaques pour la détermination du comportement en traction en application de l'Annexe E. Le système d'assurance qualité du producteur doit prévoir une vérification de l'homogénéité de la répartition des fibres à l'issue de la réalisation des essais sur prismes.

Dans le cas où un traitement thermique tel que décrit en 5.4.8 est appliqué, l'épreuve de convenance comprend également la fabrication et la conservation des éprouvettes permettant de vérifier le respect des exigences du 4.3.3.

7.3.1.2 Élément témoin

L'épreuve de convenance doit comprendre en outre la réalisation d'un élément témoin représentatif de l'ouvrage réel et de ses conditions de production. Cet élément, dont certaines dimensions peuvent être réduites, doit conserver l'échelle 1 dans les directions de plus faible épaisseur, dans les zones d'application d'efforts concentrés, et doit permettre d'appréhender les difficultés éventuelles d'écoulement du BFUP et de déformations gênées. Il doit permettre de valider les éléments suivants :

- a) la méthodologie de mise en place du BFUP, son efficacité et son effet sur l'orientation des fibres (caractérisé par la détermination des facteurs d'orientation K), intégrant le cas échéant les sujétions de mise en place de charges successives ;
- b) les dispositions prévues pour réaliser la cure du béton ;
- c) les dispositions prévues pour préparer les zones de reprise de bétonnage éventuelles ;
- d) éventuellement la conformité des parements à la qualité requise ;
- e) l'obtention des tolérances dimensionnelles et éventuellement d'enrobage ;
- f) éventuellement la capacité de réaliser de façon maîtrisée le(s) traitement(s) thermique(s) ;
- g) le cas échéant, la cinétique de décoffrage en lien avec le développement des résistances.

La définition de détail de l'élément témoin et du programme de l'épreuve de convenance associé à cet élément, dont le plan de prélèvement pour détermination des facteurs d'orientation K , doit faire l'objet d'un accord du prescripteur, du producteur du BFUP et (sauf pour un produit préfabriqué en BFUP relevant d'une norme de produit) du maître d'œuvre. La détermination des facteurs d'orientation K doit être effectuée en application de l'Annexe F.

NF P 18-470

7.3.2 Critères d'acceptation de l'épreuve de convenance

7.3.2.1 Généralités

L'épreuve de convenance est considérée comme probante si les conditions suivantes sont toutes remplies :

- tous les résultats de consistance (mesurés dans l'intervalle correspondant à la durée pratique d'utilisation) sont conformes à la classe spécifiée, ou se trouvent dans la plage spécifiée relative à la valeur cible de consistance, dans les conditions de température conformes au 5.2.10, ou dans les conditions de température représentatives du processus de production prévu ;
- les résultats des essais de résistance en compression et de comportement en traction vérifient les exigences décrites ci-après ;
- lorsqu'un traitement thermique tel que décrit en 5.4.8 est appliqué, les exigences du 4.3.3 sont satisfaites ;
- lorsque ces propriétés sont spécifiées pour le projet, les résultats obtenus en termes de teneur en air du BFUP frais, de caractéristiques additionnelles éventuelles associées à la consistance du BFUP frais en lien avec les modalités de sa mise en place, en termes de module d'Young, ou de développement de la résistance, sont tous compris dans la plage spécifiée autour de la valeur cible ;
- les valeurs de K_{global} et de K_{local} sont inférieures ou égales aux valeurs spécifiées, pour toutes les parties d'ouvrages et directions considérées ;
- les procédures de mise en œuvre et traitement du BFUP appliquées lors de la fabrication de l'élément témoin sont validées par l'obtention sur cet élément témoin des performances spécifiées.

7.3.2.2 Critères d'acceptation des essais de résistance à la compression

Les résultats des essais de compression sont jugés satisfaisants si les inégalités (6) et (7) suivantes sont satisfaites :

$$f_{cm} \geq f_{ck,req} + C_E - (C_{moy} - 3S_c) \quad (6)$$

$$f_{cm} \geq 1,1 f_{ck,req} \quad (7)$$

Dans ces inégalités, les valeurs étant exprimées en MPa :

- f_{cm} est la moyenne arithmétique des résultats de résistance à la compression ;
- $f_{ck,req}$ est la valeur caractéristique requise de la résistance à la compression ;
- pour les BFUP produits sans utilisation de pré-mélange de constituants :
 - C_E est la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'épreuve d'étude, déterminée selon la norme NF EN 196-1 ;
 - C_{moy} est la valeur moyenne de la résistance à la compression à 28 jours du ciment, déterminée selon la norme NF EN 196-1, observée par le fournisseur au cours des six mois précédant l'épreuve d'étude ;
 - S_c est l'écart type des valeurs utilisées pour déterminer C_{moy} ;
- pour les BFUP fabriqués à partir de pré-mélange de constituants :
 - C_E est la résistance à la compression du matériau de contrôle obtenu avec le pré-mélange utilisé pour l'épreuve d'étude, déterminée selon l'Annexe G ;

- C_{moy} est la valeur moyenne de la résistance à la compression du matériau de contrôle déterminée selon l'Annexe G, observée par le fournisseur du pré-mélange au cours des six mois précédant l'épreuve de convenance ;
- S_c est l'écart type des valeurs utilisées pour déterminer C_{moy} .

7.3.2.3 Critères d'acceptation des essais de comportement en traction

Les résultats des essais de comportement en traction sur éprouvettes moulées (réalisés et analysés selon l'Annexe D ou l'Annexe E) sont jugés satisfaisants si toutes les conditions suivantes sont satisfaites :

- a) chaque valeur individuelle de limite d'élasticité issue des essais $f_{cti,el}$ est supérieure à 1,0 fois la valeur caractéristique requise $f_{ctk,el,req}$;
- b) la moyenne des limites d'élasticité $f_{cti,el}$, notée $f_{ctm,el}$, est supérieure à 1,05 fois la valeur requise $f_{ctk,el,req}$;
- c) l'estimation de la courbe caractéristique du comportement en traction déterminée selon l'Annexe D ou l'Annexe E doit être supérieure ou égale en tout point à la loi requise par référence au 6.2 ;
- d) l'estimation de la courbe moyenne du comportement en traction déterminée selon l'Annexe D ou l'Annexe E doit être, au-delà de la limite élastique, supérieure ou égale en tout point à 1,1 fois la loi requise par référence au 6.2.

8 Maîtrise de la production des BFUP

8.1 Maîtrise de la production et du transport du BFUP frais

La production et le transport du BFUP jusqu'à l'emplacement de sa mise en place doivent être réalisés sous assurance de la qualité et faire l'objet d'un contrôle interne par le producteur du BFUP. Il convient que le producteur de BFUP dispose d'informations sur la durée et les conditions de stockage des constituants utilisés, compatibles avec l'obtention des performances attendues, et en tienne compte dans son organisation. En particulier s'il utilise un pré-mélange, il convient qu'il respecte les préconisations permettant d'atteindre les performances mentionnées dans la carte d'identité associée au pré-mélange utilisé.

La procédure associée doit comprendre toutes les exigences d'exécution décrites dans la norme NF P 18-451. Elle doit en outre comprendre les contrôles de production suivants :

- a) un contrôle des constituants entrant dans la composition du BFUP, sur la base des fiches techniques produits régulièrement mises à jour, complété périodiquement par des essais à réception, permettant de vérifier le respect des exigences listées en 5.1 et 5.2 ;
- b) un contrôle des délais et conditions de stockage des constituants ;
- c) un contrôle du respect des tolérances de composition conformément aux objectifs indiqués en 5.2.1 ;
- d) un contrôle du respect de la procédure de malaxage décrite en 5.2.12 ;
- e) un contrôle de l'homogénéité du BFUP frais à l'issue du transport, par référence au 5.4.4 ;
- f) un contrôle de la température du BFUP frais immédiatement avant mise en place (voir 5.2.10 et 5.4.6) ;
- g) la définition des actions correctives en cas d'écart.

NF P 18-470

Les contrôles visés au présent paragraphe doivent notamment s'appuyer :

- a) sur l'enregistrement des pesées et des caractéristiques décrivant la séquence de malaxage ;
- b) sur les mesures de consistance réalisées éventuellement en sortie de malaxeur et obligatoirement, pour chaque charge, à la livraison et à l'issue du transport pour mise en place, selon les exigences de la norme NF P 18-451 ;
- c) sur la mesure de caractéristiques additionnelles associées à la consistance du BFUP frais, lorsque de telles propriétés sont prescrites ;
- d) sur l'enregistrement de la température du BFUP frais ;
- e) sur des prélèvements de BFUP frais réalisés et analysés selon les exigences du 5.4.4.

Le système qualité du producteur de BFUP doit permettre d'isoler une charge qui ne respecterait pas les valeurs cibles de ce système, soit au stade des pesées, soit au stade des contrôles sur prélèvement de BFUP en sortie de malaxeur ou après transport.

Les enregistrements associés à la maîtrise de la production et du transport du BFUP doivent être conservés au minimum 36 mois au titre du contrôle interne du producteur de BFUP et doivent être communiqués à l'utilisateur du BFUP, sur demande. Ils peuvent figurer sur le bon de livraison, avec le rappel de la spécification du BFUP, lorsque la livraison du BFUP frais correspond à un transfert de propriété.

Le contrôle interne associé à la production de BFUP peut être complété par un contrôle contradictoire sur la base des essais sur BFUP frais visés ci-dessus, ou par un contrôle externe par tierce partie. Les dispositions de tels contrôles ne font pas partie du présent document et relèvent des documents particuliers du marché.

8.2 Maîtrise de la mise en œuvre du BFUP frais

La mise en œuvre du BFUP frais doit être réalisée sous assurance de la qualité. Les dispositions d'assurance qualité mises en œuvre par l'utilisateur et les exigences correspondantes sont décrites dans la norme NF P 18-451.

Les enregistrements associés à la maîtrise de la mise en œuvre du BFUP doivent être conservés au minimum 36 mois et doivent être communiqués au prescripteur sur demande.

8.3 Maîtrise de la prise et de la maturation des BFUP

Les dispositions d'assurance qualité concernant la maîtrise de la prise et de la maturation du BFUP sont décrites dans la norme NF P 18-451.

Les contrôles doivent au minimum comprendre :

- a) le contrôle de l'atteinte des exigences du 5.4.7, dont les modalités et la fréquence ont été déterminées dans le protocole correspondant ;
- b) le contrôle de l'application le cas échéant du protocole de traitement thermique, par enregistrement continu des valeurs de température et d'humidité relative associées à ces opérations ;

NF P 18-470

- c) le contrôle de l'atteinte des spécifications en termes de résistance en compression et de comportement en traction, ce contrôle devant être réalisé à une fréquence faisant l'objet d'un accord entre le producteur, l'utilisateur de BFUP et le prescripteur, cette fréquence devant être au minimum d'un prélèvement pour tout volume de BFUP produit inférieur à 10 m³, plus un prélèvement par tranche de 10 m³ supplémentaire produite ou fraction restante. Chaque prélèvement doit permettre de réaliser 3 essais de compression selon l'Annexe C et, selon l'épaisseur de l'élément concerné, 6 essais de flexion sur prismes non entaillés selon l'Annexe D ou 6 essais de flexion sur plaques minces dans la direction la plus critique selon l'Annexe E.

Lorsque les propriétés suivantes sont spécifiées pour le projet donné, les contrôles peuvent en outre comprendre des mesures permettant de vérifier l'atteinte des spécifications associées, selon des modalités et à une fréquence faisant l'objet d'un accord entre le prescripteur, le producteur de BFUP et l'utilisateur. Ces mesures sur BFUP durci peuvent par exemple porter sur :

- a) les caractéristiques associées au développement de la résistance, par exemple résistances à une échéance précoce (associée au décoffrage ou à l'application de la précontrainte) ;
- b) la masse volumique ;
- c) le module d'Young ;
- d) les caractéristiques de retrait ;
- e) les caractéristiques liées au fluage ;
- f) des exigences performantielles portant sur le matériau BFUP liées à l'aspect de parement ;
- g) la porosité à l'eau ;
- h) le coefficient de diffusion des ions chlorure ;
- i) la perméabilité aux gaz ;
- j) l'absorption capillaire ;
- k) la caractérisation de la résistance à des attaques chimiques (lixiviation, attaque acide, ...) ;
- l) la caractérisation de la résistance à l'abrasion.

Les contrôles associés à des propriétés spécifiées doivent être réalisés de façon contradictoire par le producteur et l'utilisateur du BFUP ainsi que pour les besoins du contrôle extérieur. Les dispositions de tels contrôles ne font pas partie du présent document et relèvent des documents particuliers du marché.

Les enregistrements associés au contrôle du BFUP mis en œuvre et aux performances du BFUP durci doivent être conservés au minimum 36 mois au titre du contrôle interne de l'utilisateur du BFUP et doivent être communiqués au prescripteur lors de la livraison de l'ouvrage ou des éléments fabriqués.

9 Contrôle de production et conformité aux exigences

9.1 Critères applicables à la production et à la livraison des BFUP à l'état frais

La conformité du BFUP produit et livré peut être prononcée si les conditions suivantes sont toutes remplies :

- a) l'enregistrement des pesées et le contrôle des sources des matériaux permettent d'attester du respect de la formule nominale dans la limite de - 2 % et + 4 % pour les fibres et de ± 2 % pour chaque autre constituant pesé ;

NF P 18-470

- b) l'enregistrement de la séquence des opérations de malaxage permet d'attester du respect de la procédure de malaxage dans la limite de $\pm 15 \%$ pour la durée de chaque phase ;
- c) la température du béton frais et la température ambiante lors de la mise en œuvre, arrondies au °C près, se situent dans les plages spécifiées ;
- d) la consistance mesurée éventuellement en sortie de malaxeur et obligatoirement, pour chaque charge, à l'issue du transport pour mise en place, se situe dans la plage spécifiée (voir 5.4.1) ;
- e) lorsque la gâchée ou le volume de BFUP livré en fait l'objet, le résultat des prélèvements de BFUP frais soumis à analyses qualitatives (par exemple, absence d'oursins) ou quantitatives (par exemple, teneur en air, teneur en fibres) selon les indications du 5.4.4 vérifie les critères définis dans la procédure qui y est visée.

Si l'une des conditions susvisées n'est pas satisfaite, les gâchées ou les charges correspondantes ou susceptibles d'avoir été affectées doivent être identifiées et éliminées lorsque cela est possible. En cas d'impossibilité, le producteur doit informer l'utilisateur sans délai. Ce dernier doit prendre les mesures curatives adaptées en respectant les dispositions de la norme NF P 18-451 et, le cas échéant, celles de la norme NF P 18-710:2016. Les gâchées et charges suivantes doivent faire l'objet de l'ensemble des enregistrements et mesures de contrôle. Si l'une des conditions susvisées n'est encore pas satisfaite, le bétonnage doit être arrêté jusqu'à la détermination des causes de la non-conformité et la modification des réglages permettant d'atteindre l'ensemble des spécifications.

9.2 Critères applicables aux BFUP durcis

9.2.1 Généralités

La conformité du BFUP mis en place et durci peut être prononcée si les conditions suivantes sont toutes remplies :

- a) les contrôles et enregistrements portant sur les opérations de mise en œuvre du BFUP respectent les exigences de 8.2 ;
- b) les enregistrements de température et d'humidité relative associés aux éventuelles opérations de traitement thermique du BFUP permettent d'attester du respect du protocole associé à ces opérations, visé en 5.4.8 ; à ce titre la température mesurée ne doit pas s'écarter de plus de 2 °C de la valeur spécifiée, l'humidité relative ne doit pas s'écarter de plus de 5 % de la valeur spécifiée, et l'âge du matériau au début de chacune des phases du traitement (intégrant le recalage en temps équivalent) ne doit pas s'écarter de plus d'1 h de la valeur spécifiée ;
- c) les résultats des essais de résistance en compression et de comportement en traction, réalisés sur éprouvettes ayant suivi le même protocole que l'ouvrage en termes de cure et de traitement thermique le cas échéant, vérifient les exigences décrites ci-après ;
- d) toutes les mesures des propriétés complémentaires faisant l'objet d'un contrôle vérifient l'inégalité spécifiée ou sont comprises dans la plage spécifiée autour de la valeur cible.

9.2.2 Critères d'acceptation des essais de résistance à la compression

Les résultats des essais de résistance en compression sont jugés satisfaisants si :

- a) d'une part, pour le projet considéré, à chaque prélèvement correspondant aux épreuves de contrôle, les inégalités (8), (9) ou (10), et (11) sont simultanément satisfaites :

$$— S_c \leq 10 \% f_{ck,req} \quad (8)$$

$$— f_{cm} \geq f_{ck,req} + 1,3 S_c \text{ si } n \geq 15 \quad (9)$$

ou

$$— f_{cm} \geq f_{ck,req} + \alpha S_c \text{ si } 3 \leq n < 15 \quad \text{avec } \alpha = [(n-3).1,3 + (15-n).1]/12 \quad (10)$$

$$— f_{ci} \geq f_{ck,req} - 7,5 \quad (11)$$

Dans ces inégalités, les valeurs étant exprimées en MPa :

- f_{cm} est la moyenne arithmétique des n résultats d'épreuves de contrôle de la résistance en compression si $n \leq 15$, et la moyenne des 15 derniers résultats si $n > 15$;
 - $f_{ck,req}$ est la valeur requise de la résistance caractéristique en compression ;
 - f_{ci} est la valeur de la résistance à la compression donnée par l'essai i ;
 - S_c est l'écart type des quinze derniers résultats précités ;
- b) d'autre part, lorsque la production d'une même composition de BFUP frais est destinée à plusieurs ouvrages, les inégalités précitées restent vérifiées en considérant les résultats correspondant à quinze prélèvements consécutifs, quel que soit l'ouvrage auquel ce BFUP est destiné.

Si l'une des trois conditions n'est pas remplie, la production doit être suspendue jusqu'à la détermination des causes de la non-conformité et une action corrective doit être engagée jusqu'à retrouver la satisfaction des inégalités.

9.2.3 Critères d'acceptation des essais de comportement en traction

Les résultats des essais de flexion 4 points sur éprouvettes non entaillées (voir 8.3, c)) sont jugés satisfaisants si :

- a) d'une part, pour chaque éprouvette (moulée), le moment maximum $M_{max,i}$ est supérieur à 0,95 fois le moment maximum M_{ref} , calculé avec la courbe de réponse en traction spécifiée (loi de calcul sans prise en compte du coefficient partiel relatif au BFUP tendu γ_{cf} ni du facteur d'orientation K , comme indiqué en 5.5.4 et 6.2) ;
- b) d'autre part, la moyenne des moments maximums, $M_{m,max}$, est supérieure à 1,05 fois M_{ref} .

10 Évaluation de conformité

10.1 Étapes de l'évaluation de conformité d'un BFUP

L'évaluation de la conformité d'un BFUP au présent document comprend plusieurs étapes qui peuvent ou non correspondre à des transferts de responsabilité :

- a) évaluation de la conformité du pré-mélange, lorsque le BFUP est produit à partir de ce pré-mélange de constituants (l'évaluation porte sur une conformité potentielle à la carte d'identité du BFUP) ;

NF P 18-470

- b) évaluation initiale de conformité du BFUP par acceptation de l'épreuve d'étude intégrant le cas échéant les données de la carte d'identité de ce BFUP (l'évaluation porte sur une conformité à la spécification, sans intégrer l'ensemble des spécificités du processus de production) ;
- c) évaluation initiale de conformité par acceptation de l'épreuve de convenance (l'évaluation porte sur une conformité complète à la spécification, intégrant à la fois la formule du BFUP et le processus de malaxage, transport, mise en place et traitement) ;
- d) évaluation de conformité en phase de production sur la base des résultats des épreuves de contrôle associées à la fourniture du BFUP frais ;
- e) évaluation de conformité en phase de production sur la base des épreuves de contrôle liées à la mise en place du BFUP, aux traitements qui lui sont appliqués, et à l'atteinte des performances spécifiées sur béton durci.

La conformité du BFUP au présent document n'est établie que si la conformité à chacune de ces étapes a été vérifiée, qu'il y ait eu ou non transfert de propriété.

10.2 Tâches et responsabilités

Le producteur d'un pré-mélange de constituants destinés à l'emploi dans des BFUP est responsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité aux propriétés spécifiées selon les modalités définies en Annexe G.

Le producteur du BFUP est responsable de l'évaluation de conformité au stade de l'épreuve d'étude dont les résultats sont soumis au prescripteur pour acceptation.

Le producteur du BFUP est responsable de l'évaluation de conformité au stade de l'épreuve de convenance, pour ce qui concerne les vérifications de consistance, de résistance en compression, de comportement en traction déterminé sur éprouvettes moulées, et de teneur en air, de module d'Young et de développement des résistances le cas échéant. L'utilisateur du BFUP est responsable de l'évaluation de conformité au stade de l'épreuve de convenance, pour ce qui concerne les facteurs d'orientation K_{global} et K_{local} et les procédures de mise en œuvre et traitement du BFUP appliquées lors de la fabrication de l'élément témoin en vue de leur validation. Sauf dans le cas de BFUP pour produits préfabriqués relevant de normes de produits, les résultats de l'épreuve de convenance doivent être soumis au maître d'ouvrage pour acceptation.

Le producteur du BFUP frais est responsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité du BFUP selon les modalités définies en 9.1 pour le respect du protocole de production et les propriétés déterminées à l'état frais, et selon les modalités définies en 9.2 pour les propriétés déterminées à l'état durci au titre de la conformité potentielle du BFUP livré : résistance en compression, comportement en traction, propriétés complémentaires spécifiées éventuelles.

L'utilisateur du BFUP frais, producteur d'un produit, d'un composant ou d'une structure en BFUP durci, est responsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité du BFUP selon les modalités définies en 9.2 pour ce qui concerne la conformité aux protocoles de mise en place, de cure et de traitement(s) thermique(s) éventuel(s), et pour ce qui concerne la conformité aux propriétés déterminées à l'état durci du BFUP mis en œuvre : résistance en compression, comportement en traction, éventuelles propriétés complémentaires spécifiées ou faisant l'objet de contrôles.

Pour les produits préfabriqués, des exigences et des dispositions spécifiques relatives à l'évaluation de la conformité du BFUP peuvent être précisées dans les spécifications techniques pertinentes (NF EN 13369:2013, normes de produits et agréments techniques).

NF P 18-470

Les contrôles internes réalisés pour l'évaluation de conformité décrits ci-dessus peuvent être complétés par un contrôle par tierce partie. Ce dernier n'est pas couvert par le présent document et relève des documents particuliers du marché.

NOTE Il convient que la réception d'un ouvrage ou de parties d'ouvrages en BFUP soit conditionnée à la fourniture des résultats de ces contrôles au maître d'œuvre.

NF P 18-470**Annexe A
(normative)****Adaptations des modes opératoires pour la détermination des classes de résistance aux transferts****A.1 Mesure du coefficient de diffusion des ions chlorures**

Effectuer la mesure à 90 jours selon la norme XP P 18-462 en tenant compte des compléments suivants :

- a) le diamètre D des corps d'épreuve doit être au moins égal à $3 L_f$ et leur épaisseur peut être réduite à 30 mm ;
- b) choisir autant que possible l'intensité I et la durée de l'essai Δt comme pour les autres bétons afin de vérifier la condition suivante : $3.10^5 \text{ A.s.m}^{-2} \leq I \times \Delta t / S \leq 9.10^5 \text{ A.s.m}^{-2}$, où S est la surface exposée du corps d'épreuve, en m^2 . Ceci conduit à une profondeur de pénétration X_d de l'ordre de 10 mm à 20 mm et permet de conserver une incertitude relative de l'essai comparable ;
- c) à défaut de pouvoir mesurer précisément l'intensité, appliquer une tension de 60 V et adopter une durée Δt de l'essai comprise entre 96 h et 500 h.

A.2 Mesure de la perméabilité apparente aux gaz**A.2.1 Vérification du seuil correspondant au domaine d'application du présent document**

Effectuer la mesure à 90 jours selon la norme XP P 18-463:2011 en tenant compte des modifications suivantes :

- a) effectuer uniquement la mesure après séchage à 105 °C, le séchage étant arrêté dès l'atteinte du critère de détermination de M_{sec} selon 7.2.2 de la norme XP P 18-463:2011 ;
- b) la détermination du débit peut être effectuée par mesure du temps de passage sur une portion réduite du tube du débitmètre (pas nécessairement entre les deux graduations volumiques maximales) ;
- c) le temps de passage de la bulle de savon sur la portion du débitmètre retenue doit être compris entre 20 s et 180 s ;
- d) en application de la note du 5.3 de la norme XP P 18-463:2011 il est également possible d'utiliser un débitmètre massique.

A.2.2 Vérification du seuil correspondant à la classe Dg+ (voir 4.2.2)

Effectuer la mesure à 90 jours selon la norme XP P 18-463:2011 en tenant compte des modifications suivantes :

- a) effectuer uniquement la mesure après séchage à 105 °C, le séchage étant arrêté dès l'atteinte du critère de détermination de M_{sec} selon 7.2.2 de la norme XP P 18-463:2011 ;
- b) l'épaisseur des corps d'épreuve traversée par le flux gazeux peut être réduite à 30 mm ;
- c) en application de la note du 5.3 de la norme XP P 18-463:2011 effectuer la mesure à l'aide d'un débitmètre massique ;

NF P 18-470

- d) il est possible d'augmenter la durée d'exposition de l'échantillon au gradient de pression de gaz de façon à atteindre un régime permanent, sans excéder 120 min. Il est également possible d'augmenter le temps t au cours duquel est mesuré le débit, sans toutefois excéder 30 min.

Annexe B (normative)

Estimation des valeurs caractéristiques

La valeur caractéristique d'une résistance correspond dans ce document, par référence à la norme NF EN 1990 (Eurocode 0), à une probabilité de dépassement de 95 %. Dans le présent document cependant, elle doit être estimée à partir d'un échantillon de valeurs expérimentales en supposant une distribution normale et en utilisant la loi de Student avec une probabilité de non réalisation inférieure à 5 %.

L'estimation de la valeur caractéristique est alors égale à la valeur moyenne expérimentale diminuée du produit du coefficient de Student (rappelé dans le Tableau B.1) par l'estimation expérimentale de l'écart type.

Tableau B.1 — Coefficients de Student

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
11	1,812
12	1,796
...	...
> 30	1,7
...	...
∞	1,645

Pour l'obtention d'estimations de courbes caractéristiques, l'analyse ci-dessus doit être réalisée point par point et non sur l'intégrale de la courbe.

Annexe C (normative)

Essai de compression et propriétés mécaniques déduites

C.1 Caractéristiques des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour les essais de compression (évaluation de la résistance ou évaluation du module) doivent respecter les critères suivants :

- a) l'éprouvette de référence est le cylindre moulé de dimensions nominales $\varnothing 110 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$, lorsque la longueur des plus longues fibres est inférieure à 22 mm, ou le cylindre moulé de dimensions nominales $\varnothing 160 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ pour des fibres plus longues. Les essais peuvent être réalisés sur des cylindres d'autres dimensions, ou sur des cubes, moyennant l'identification, dès les épreuves d'étude ou dans la carte d'identité du BFUP, du coefficient de passage par rapport à la valeur déterminée sur éprouvette de référence ; dans tous les cas la plus petite dimension ϕ des éprouvettes doit vérifier $\phi \geq 5 L_f$ et $\phi \geq 6 D_{sup}$ (L_f étant la longueur des plus longues fibres et D_{sup} la dimension nominale supérieure du plus gros granulat) ;
- b) les éprouvettes doivent satisfaire aux exigences des normes NF EN 12390-1, NF EN 12390-2 et NF EN 12390-3:2012, en notant que pour des éprouvettes de dimension hors des valeurs de référence de la norme NF EN 12390-1, l'Annexe B de la norme NF EN 12390-3, s'applique ;
- c) pour l'application de la norme NF EN 12390-2, le remplissage des moules et le serrage doivent être adaptés à la consistance du BFUP. Pour les BFUP de classe Ca la mise en place se fait de façon gravitaire, pour les BFUP de classe Cv le serrage peut être amélioré par l'utilisation d'une tige de piquage, pour les BFUP de classe Ct une vibration externe peut être utilisée si elle est représentative de la mise en œuvre dans l'ouvrage. Dans tous les cas l'utilisation d'une aiguille vibrante est exclue ;
- d) compte tenu des résistances élevées attendues, le surfacage doit être réalisé au lapidaire et doit faire l'objet d'un soin particulier.

C.2 Détermination de la résistance en compression

Les essais doivent être effectués en application de la norme NF EN 12390-3:2012, avec les précisions suivantes :

- a) la presse doit être pilotée en force avec une vitesse de mise en charge comprise entre 0,4 MPa/s et 0,8 MPa/s ;
- b) pour un prélèvement, la détermination d'une valeur moyenne de résistance doit être obtenue comme la moyenne d'un minimum de 3 éprouvettes ;
- c) l'estimation de la valeur caractéristique de la résistance à la compression pour la population de résultats considérée doit être obtenue en application de l'Annexe B du présent document.

C.3 Détermination du module d'Young

Avant l'essai de détermination du module d'Young, il convient de déterminer la résistance moyenne du béton considéré grâce à trois essais à rupture.

NF P 18-470

Les essais de détermination du module d'Young doivent être effectués par application de la norme NF EN 12390-13:2014, corrigée des indications de C.1 en termes de forme et dimensions d'éprouvettes. La méthode B de cette norme est appliquée afin de déterminer le module d'Young, estimé comme un module sécant stabilisé.

Les indications complémentaires suivantes s'appliquent :

- les mesures de déformations doivent être réalisées au moyen d'extensomètres, en nombre supérieur ou égal à trois, et disposés de manière symétrique sur l'éprouvette ;
- la précision et l'étalonnage des extensomètres doivent garantir une erreur absolue inférieure à 5 $\mu\text{m}/\text{m}$.

C.4 Détermination du coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson des BFUP doit être déterminé sur des éprouvettes identiques à celles permettant la mesure du module d'Young, testées selon le même protocole (norme NF EN 12390-13:2014, adaptée selon C.3), les mesures issues des extensomètres disposés transversalement étant exploitées de façon analogue.

Annexe D (normative)

Essais de flexion sur prismes et méthode d'exploitation

D.1 Introduction

Cette annexe décrit les procédures expérimentales et d'analyse des résultats permettant de caractériser les performances en traction des BFUP par le biais d'essais de flexion, lorsque (contrairement aux éléments minces pour lesquels on applique l'Annexe E) l'orientation des fibres n'est pas influencée par une épaisseur de l'élément réduite par rapport à la dimension des fibres.

Deux types d'essais sont présentés :

- d'une part, des essais de flexion quatre points sur prismes non entaillés permettant d'accéder à la limite du comportement linéaire ;
- d'autre part, des essais de flexion trois points sur prismes entaillés qui permettent d'accéder à la contribution des fibres comme renfort d'une section fissurée, et permettent de déterminer la classe de comportement en traction (voir 4.4.3).

L'annexe décrit la méthode d'exploitation de ces essais permettant, par analyse inverse, de déterminer une courbe équivalente de réponse du matériau en traction directe.

Les essais doivent être réalisés et exploités par lots de 6 éprouvettes du même type au minimum. La détermination de la limite d'élasticité en traction, et l'analyse inverse permettant de déterminer le comportement post-pic en traction, doivent être appliquées sur la courbe moyenne et sur la courbe caractéristique issues de la série de résultats d'essais.

D.2 Dimensions et préparation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être des prismes de section carrée, de côté a et de longueur $4a$. La dimension a , comprise entre 7 cm et 20 cm, doit être comprise entre 5 et 7 fois la longueur des plus longues fibres.

Ces critères de dimension s'appliquent de façon générale pour des prismes moulés comme pour les prismes prélevés par sciage (en particulier lors de l'épreuve de convenance pour détermination du coefficient K). Pour ces derniers, compte tenu de la géométrie de la structure d'origine, le critère de longueur des prismes peut être relaxé (sans que la portée égale à 3 fois la hauteur ne soit modifiée), ainsi que le critère de largeur des prismes (qui pourra varier entre la moitié de la hauteur des prismes et une fois et demie la hauteur).

Pour des prismes coulés en BFUP de classe de consistance Ca et Cv , l'éprouvette doit être fabriquée en laissant le BFUP s'écouler à partir d'une extrémité du moule, l'écoulement étant favorisé par piquage uniquement pour les BFUP de classe de consistance Cv , le rechargement se faisant systématiquement en arrière du front. Pour ces classes de consistance, la vibration est interdite.

Pour des prismes coulés en BFUP de classe de consistance Ct une méthode de mise en œuvre répétable dérivée de celle employée pour l'ouvrage doit être définie.

Dans tous les cas le remplissage du moule par tas juxtaposés est interdit.

Pour les prismes qui doivent être entaillés, une entaille doit être sciée en section centrale, du côté de la face tendue lors de l'essai de flexion. Cette face doit être une des faces latérales coffrées lors du coulage du prisme. La profondeur de l'entaille est égale à la demi-longueur des plus longues fibres. La largeur de l'entaille doit être inférieure à 3 mm.

NF P 18-470

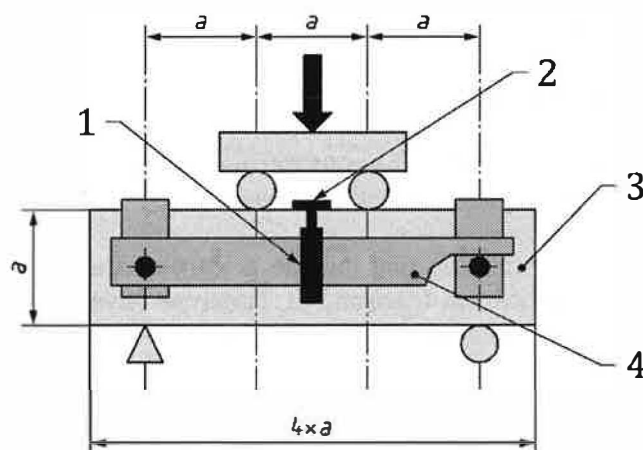
D.3 Réalisation des essais

Les éprouvettes sont testées en flexion trois points (flexion centrée) pour les prismes entaillés, quatre points (flexion circulaire) pour les prismes non entaillés, en prenant appui sur les deux faces latérales dans les cas des prismes moulés. Dans le cas de prismes sciés, l'orientation des éprouvettes doit faire en sorte que les faces latérales lors de l'essai aient le même type d'effet de bord vis-à-vis des fibres. Cette orientation doit être identique pour tous les prismes d'une même série et mentionnée dans le rapport d'essais.

La longueur entre appuis inférieurs est égale à trois fois la hauteur du prisme.

La machine d'essai est une presse de traction/compression pouvant être asservie en déplacement vérin ou sur un capteur externe. Le dispositif d'appui et d'application de la charge doit être composé d'un point fixe et de points mobiles (par exemple des appuis à rouleaux), pour limiter l'effort normal parasite.

Dans le cas des essais de flexion quatre points, un capteur de déplacement doit être fixé par un dispositif spécifique sur l'échantillon afin de mesurer la flèche de l'échantillon au cours de l'essai (Figure D.1). On peut également mesurer la déformation moyenne en fibre inférieure de l'éprouvette grâce à un ou plusieurs extensomètres disposés au niveau de la fibre inférieure du prisme. Ce ou ces capteurs peuvent être fixés par l'intermédiaire de plots collés.

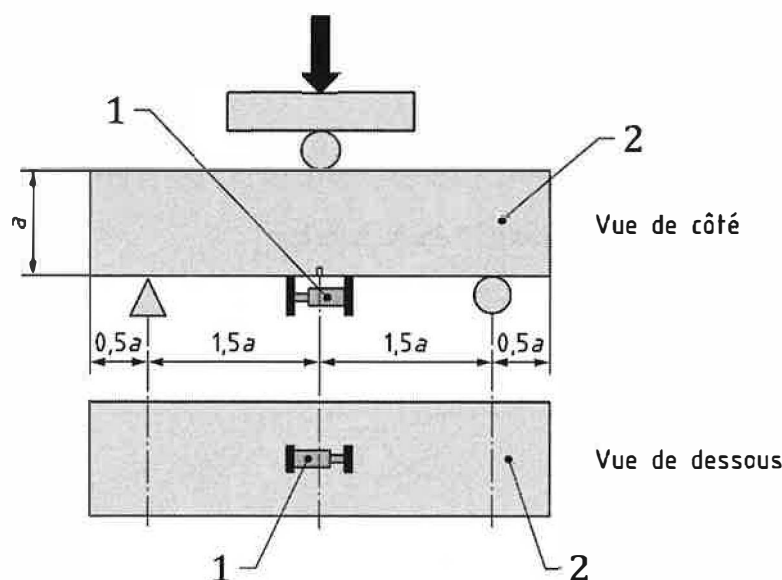


Légende

- 1 Capteur de déplacement
- 2 Plaque de renvoi collée, par exemple en aluminium
- 3 Éprouvette
- 4 Dispositif de mesure de flèche

Figure D.1 — Principe de mesure de la flèche dans un essai de flexion quatre points

Dans le cas des essais de flexion trois points, un capteur pontant l'entaille est fixé sur le prisme au niveau de la fibre tendue inférieure du prisme (Figure D.2). La distance entre les plots de fixation doit être constante d'un essai à l'autre et inférieure à 5 cm. La course du capteur doit être d'au moins 2 mm. La précision de la mesure du déplacement doit être meilleure que 0,5 % de la pleine échelle.



Légende

- 1 Extensomètre
- 2 Éprouvette

Figure D.2 — Principe de mesure de l'ouverture de fissure dans un essai de flexion trois points

Une pré-charge est appliquée sur l'éprouvette, d'intensité aussi faible que possible, qui doit être prise en compte dans la suite de l'essai.

NOTE L'application de cette pré-charge peut être effectuée par contrôle en déplacement vérin ou par contrôle en force.

Après application de la pré-charge, l'asservissement est effectué soit sur le capteur d'ouverture de fissure, soit sur le capteur de flèche, soit sur le capteur de déplacement vérin.

Selon le capteur retenu pour le pilotage de l'essai, la vitesse de chargement doit être adaptée comme suit :

- en pilotage vérin : $(0,25 \pm 0,1)$ mm/min ;
- en pilotage sur la flèche : $(0,1 \pm 0,05)$ mm/min ;
- en pilotage sur le capteur mesurant l'élongation en fibre inférieure, ou pontant la fissure : $(0,025 \pm 0,01)$ mm/min.

L'essai est poursuivi jusqu'à l'atteinte d'au moins un des critères suivants :

- une flèche mesurée directement sur l'échantillon de $0,015 \times a$ (a étant la hauteur du prisme) ;
- une élongation en fibre inférieure de $0,015 \times a$ (a étant la hauteur du prisme).

L'enregistrement des données au cours de l'essai doit être effectué à une fréquence d'au moins 5 enregistrements par seconde. Les signaux à enregistrer sont :

- a) le temps ;
- b) l'ouverture de la fissure ou l'élongation de la fibre inférieure ;
- c) la flèche ;

NF P 18-470

- d) la force ;
- e) éventuellement le déplacement du vérin.

D.4 Exploitation de l'essai de flexion 4 points sur prismes non entaillés

D.4.1 Détermination de la limite d'élasticité en traction

La courbe issue des courbes effort – flèche ou effort – élongation issue des essais de flexion 4 points permet de déterminer la valeur de l'effort (F_{nl}) correspondant à la perte de linéarité du comportement. La contrainte correspondante, dénommée limite d'élasticité en flexion, est calculée par la formule (D.1) suivante :

$$f_{ct,fl} = 3 F_{nl} / b.a \quad (D.1)$$

avec F_{nl} en N, a et b en mm, et $f_{ct,fl}$ en MPa

où a est la hauteur du prisme en mm et où b est la largeur du prisme en mm.

Pour obtenir une estimation considérée comme intrinsèque la limite d'élasticité en traction $f_{ct,el}$ est calculée par application de la formule (D.2) suivante :

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} \frac{\kappa a^{0,7}}{1 + \kappa a^{0,7}} \quad (D.2)$$

où

$$\kappa = 0,08$$

et où a est la hauteur du prisme en mm.

NOTE Le coefficient κ peut être re-calibré pour des BFUP de classe T3, il sera en général supérieur à 0,08 ce qui augmentera la limite $f_{ct,el}$ calculée.

La limite d'élasticité moyenne $f_{ctm,el}$ doit être déterminée par application de la méthode à la courbe moyenne issue des essais.

La limite d'élasticité caractéristique $f_{ctk,el}$ doit être déterminée par application de la même méthode à la courbe caractéristique issue des essais.

D.4.2 Exploitation dans le cas des BFUP de classe T3

Dans le cas des BFUP de classe T3, pour lesquels une analyse en contrainte-déformation doit être conduite conformément à la norme NF P 18-710:2016, la loi σ - ε en traction doit être déduite des essais de flexion 4 points en utilisant la méthode d'analyse inverse point par point décrite dans l'Annexe E du présent document.

D.5 Exploitation des essais de flexion 3 points sur prisme entaillé

D.5.1 Détermination de l'ouverture de la fissure

Pour tenir compte, sur chacune des courbes d'essai, de la déformation élastique sur la base de mesure du capteur pontant l'entaille, l'ouverture de fissure doit être déterminée en ôtant la valeur d'élongation w_0 mesurée à la fin du domaine élastique (perte de linéarité) aux valeurs d'élongation mesurées ultérieurement. Cette opération effectue simplement un changement de repère et place la nouvelle origine des courbes à l'instant supposé de la localisation de la fissure.

Dans le cas d'un essai où l'ouverture de la fissure n'est pas enregistrée, cette dernière doit être estimée à partir de la mesure f de la flèche. Connaissant la flèche f_0 qui correspond à la fin du domaine élastique, l'ouverture de la fissure (w) est déterminée par la relation (D.3) suivante :

$$w = 4/3 \times 0,9 \times (f - f_0) \quad (\text{D.3})$$

D.5.2 Filtrage des données

Le filtrage des données doit être effectué sur chacune des courbes d'essai effort-ouverture de fissure, afin de réduire le bruit des données expérimentales pour faciliter la mise en œuvre de la méthode inverse. Elle consiste, au-delà du premier point correspondant à la fin du domaine élastique, d'ouverture de fissure nulle, à adopter une représentation discrète de la courbe avec un pas de 20 μm et à réaliser une moyenne mobile des efforts enregistrés sur des intervalles de 40 μm en affectant cette valeur au point central de l'intervalle.

À l'issue de cette opération, les courbes correspondant aux différentes éprouvettes ont une même base d'abscisses en vue du traitement.

D.5.3 Détermination de la loi post-fissuration en traction par méthode inverse

L'analyse de l'essai par méthode inverse permet d'obtenir l'expression de la contrainte de traction en fonction de l'ouverture de la fissure à partir des résultats expérimentaux reliant le moment appliqué à l'ouverture de la fissure. La méthode doit être appliquée sur les données filtrées afin d'obtenir une convergence numérique stable, en considérant la courbe moyenne et la courbe caractéristique issues du lot de résultats d'essais.

D.5.3.1 Équilibre mécanique de la section fissurée

La Figure D.3 illustre une section fissurée d'un prisme en flexion.

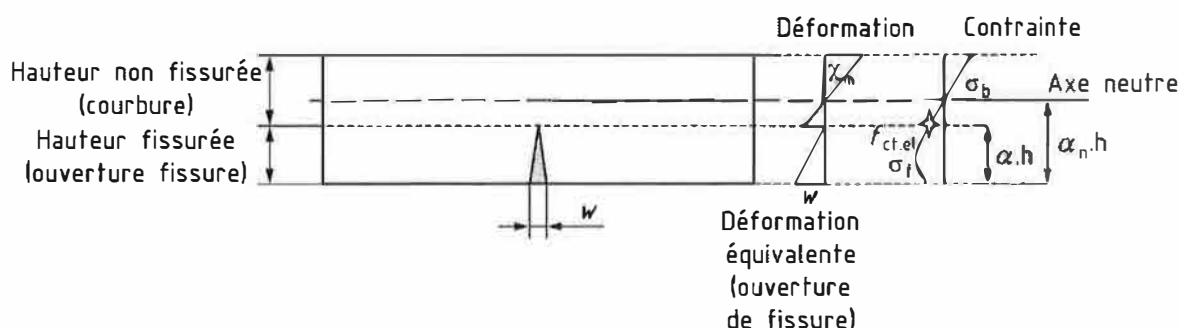


Figure D.3 — Répartition des déformations et contraintes sur la hauteur fissurée et non fissurée

Deux parties sont distinguées, celle non fissurée où la distribution des contraintes correspond à un comportement élastique linéaire, et celle fissurée où la distribution des contraintes dépend directement de l'efficacité des fibres. C'est cette dernière distribution que l'on recherche et qui résulte de l'exploitation par la méthode inverse. L'équilibre mécanique de la section conduit aux équations (D.4) à (D.7) suivantes, en notant par l'indice b la contribution de la partie non fissurée et par l'indice f , celle de la partie fissurée :

$$N_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} \left[(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2 \right] \quad (\text{D.4})$$

$$N_f = \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w} \int_0^w \sigma_f \cdot d\omega \quad (\text{D.5})$$

NF P 18-470

$$M_f = \alpha h N_f - \frac{(\alpha h)^2 \cdot b}{w^2} \int_0^w \sigma_f \cdot \omega \cdot d\omega \quad (D.6)$$

$$M_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} \left[(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3 \right] + h \cdot \alpha_n N_b \quad (D.7)$$

$$M = M_b + M_f \quad (D.8)$$

$$N = N_b + N_f = 0 \quad (D.9)$$

où

M est le moment résistant, M , M_b et M_f étant en MN·m ;

N est l'effort normal, égal à 0, N_b et N_f étant en MN ;

α est la hauteur relative de la fissure (voir Figure D.3) ;

α_n est la hauteur relative de l'axe neutre donnée par : $\sigma_t = E_{cm} \cdot \chi_m \cdot h \cdot (\alpha - \alpha_n)$

χ_m est la courbure de la partie non fissurée en m⁻¹ ;

$f_{ct,el}$ est la limite d'élasticité en traction (valeur moyenne $f_{ctm,el}$ ou caractéristique $f_{ctk,el}$ suivant la courbe traitée, déterminée suivant le C.4 ci-avant), en MPa ;

E_{cm} est la valeur moyenne du module d'Young, en MPa ;

b est la largeur de la section, en m ;

h est la hauteur de la section (après déduction de la profondeur de l'entaille), en m.

On relie l'ouverture de la fissure à la courbure de la partie non fissurée grâce à la relation cinématique (D.10) suivante :

$$w = [\chi_m + 2 \cdot \chi_e] \frac{2 \cdot (\alpha h)^2}{3} \quad (D.10)$$

où χ_e est la courbure élastique équivalente, en m⁻¹, donnée par : $\chi_e = M / (E_{cm} \cdot I)$ où I est l'inertie de la section rectangulaire.

La relation entre la hauteur fissurée et la position de l'axe neutre se déduit au moyen de l'expression (D.11) suivante :

$$(\alpha_n - \alpha) \cdot h \cdot \chi_m \cdot E_{cm} = f_{ct,el} \quad (D.11)$$

Pour des raisons pratiques, le capteur pontant la fissure est en général légèrement décalé d'un écart e par rapport à la cote du fond de l'entaille. L'analyse inverse doit prendre en compte l'effet de cet écart en corrigeant le résultat de la mesure w_{mes} par application de l'équation (D.12) suivante :

$$w = w_{mes} [a \cdot h / (a \cdot h + e)] \quad (D.12)$$

D.5.3.2 Résolution itérative

La courbe contrainte-ouverture de fissure recherchée est déterminée de façon discrète par des couples de points (w_i, σ_{fi}) . La discrétisation de l'abscisse qui correspond aux ouvertures de fissure (pas de 20 μm) est suffisamment fine pour exprimer conformément à (D.13) l'intégrale des contraintes par une approximation trapèze, soit :

$$\int_0^{w_{i+1}} \sigma_f \cdot dw = \int_0^{w_i} \sigma_f \cdot dw + \left(\frac{\sigma_{fi} + \sigma_{fi+1}}{2} \right) (w_{i+1} - w_i) \quad (\text{D.13})$$

Par suite, les expressions de l'effort normal N_{fi+1} et du moment M_{fi+1} de la partie fissurée peuvent s'écrire de façon incrémentale conformément aux expressions (D.14) et (D.15) :

$$N_{fi+1} = N_{fi} \cdot \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} + \alpha_{i+1} \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{\sigma_{fi} + \sigma_{fi+1}}{2} \right) \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \quad (\text{D.14})$$

$$M_{fi+1} = M_{fi} \cdot \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} \cdot h \cdot N_{fi+1} \cdot \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) - \frac{(\alpha_{i+1} \cdot h)^2 \cdot b}{2} \cdot \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 \cdot \sigma_{fi+1} \quad (\text{D.15})$$

Ainsi, considérant que la relation contrainte ouverture de fissure est connue jusqu'à l'itération i , on obtient les deux inconnues contrainte et hauteur relative de la fissure à l'itération $i+1$, respectivement σ_{fi+1} et α_{i+1} par résolution des équations ci-dessus, exprimant la nullité de l'effort normal et l'égalité du moment résistant de la section avec le moment expérimental.

Afin de démarrer le processus incrémental, il suffit de prendre pour valeurs initiales le point défini comme moment de fissuration (fin du domaine élastique), avec une ouverture de fissure nulle, conformément à la relation (D.16) :

$$M_b^0 = M_{ext} = \frac{-bh^2 \cdot \sigma_f^0}{6} \quad (\text{D.16})$$

$$\text{avec } M_f^0 = 0 ; N_b^0 = 0 ; N_f^0 = 0$$

À l'issue de chaque incrément, une correction est effectuée sur la valeur de l'itération i après avoir calculé l'itération $i+1$. Ce lissage correspond à la moyenne mobile (D.17) suivante :

$$\sigma_{fi} = (2 \sigma_{fi} + \sigma_{fi+1}) / 3 \quad (\text{D.17})$$

D.6 Correction des effets de bord dus au coulage, au sciage ou à l'entailage

Le résultat de la partie post-fissuration des analyses précédentes est pondéré en fonction de variations de l'orientation locale ou des conditions d'ancrage locales des fibres, par référence à une situation théorique d'ancrage parfait correspondant au comportement supposé intrinsèque du BFUP au cœur d'un élément « massif ».

D.6.1 Bords moulés

Lorsque les prismes sont moulés, l'orientation des fibres tend à devenir 2D à proximité des parois du coffrage. On applique donc un facteur 1,2 sur une largeur de $L_f/2$ pour avoir l'équivalent de l'efficacité en 3D, sauf si ce bord se situe du côté de la zone comprimée lors de l'essai de flexion.

NF P 18-470

D.6.2 Bords sciés

Lorsqu'on est proche d'une paroi sciée, on doit tenir compte du fait que les fibres ont elles aussi été sciées. On considère que la moitié des fibres ne sont plus ancrées sur une largeur $L_f/2$. On applique donc un facteur $1/2$ sur une largeur $L_f/2$, sauf si ce bord se situe du côté de la zone comprimée lors de l'essai de flexion.

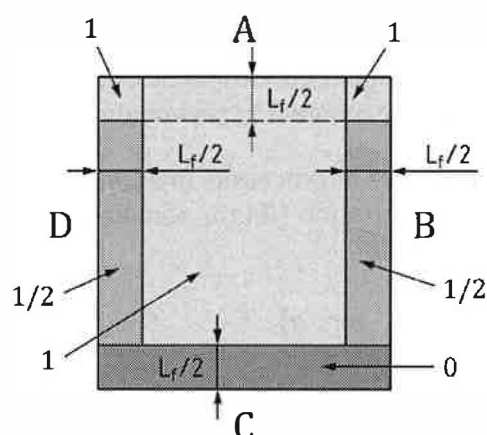
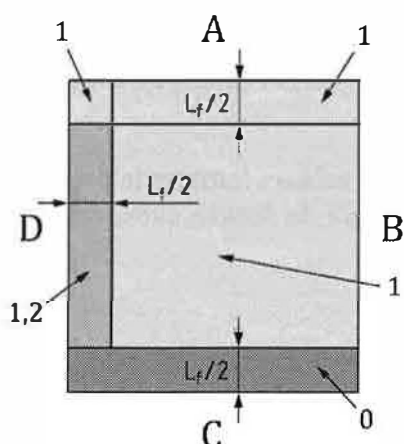
D.6.3 Entaille

La surface de l'entaille n'est pas prise en compte dans le calcul de la section résistante. Il n'est pas appliqué de coefficient réducteur pour la surface en fond d'entaille, où l'ancrage et l'orientation des fibres ne sont pas perturbés.

D.6.4 Calcul de la correction

Le résultat expérimental obtenu est associé à une section pondérée par le coefficient 1 en partie centrale, et par les coefficients détaillés ci-dessus le long des bords latéraux. La correction consiste à diviser les valeurs de contrainte de la courbe de traction issues de l'analyse ci-dessus, par le coefficient pondéré sur l'ensemble de la section du prisme d'essai. On obtient, ce faisant après cette correction, la courbe de comportement réputée intrinsèque.

La Figure D.4 donne l'exemple d'un prisme moulé et celui d'un prisme scié avec les coefficients à appliquer.



Légende

- A Surface coffrée, bord comprimé
- B Surface non coffrée
- C Surface coffrée neutralisée par l'entaille
- D Surface coffrée

a) Prisme moulé

Légende

- A Surface non coffrée, bord libre comprimé
- B Surface sciée
- C Surface de l'entaille
- D Surface sciée

b) Prisme scié

Figure D.4 — Exemples de prise en compte des effets de bord

D.7 Représentation simplifiée

Il est possible de fournir une description linéaire par morceaux de la courbe caractéristique du comportement en traction du BFUP issue des traitements selon D.4 et D.5. Cette description, cohérente notamment avec les lois conventionnelles présentées au 3.1.7.3.2 de la norme NF P 18-710:2016, revient à la donnée d'un jeu de valeurs de contraintes, tirées de la courbe, associées à des ouvertures de fissure fixées a priori : limite d'élasticité (associée à $w = 0$), contrainte correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 mm ou contrainte maximale σ_w si celle-ci est obtenue pour une ouverture de fissure supérieure à 0,3 mm, contrainte correspondant à une ouverture de fissure égale à 1 % de la hauteur du prisme d'essai, contrainte supposée nulle associée à une ouverture $L_f/4$ (L_f étant la longueur des plus longues fibres contribuant à assurer la non-fragilité).

Si la limite d'élasticité est supérieure à la contrainte au pic ou à la contrainte correspondant à une ouverture de 0,3 mm, la courbe doit être écrêtée à la plus faible de ces valeurs.

Il est possible d'effectuer la représentation simplifiée similaire pour la courbe moyenne.

Les valeurs de contrainte associées à ces représentations simplifiées doivent être déterminées à 0,1 MPa près.

Annexe E (normative)

Essais de flexion sur plaques minces et méthode d'exploitation

E.1 Introduction

Cette annexe décrit les procédures expérimentales et d'analyse des résultats permettant de caractériser les performances en traction des BFUP par le biais d'essais de flexion, lorsque (contrairement aux éléments dits épais pour lesquels on applique l'Annexe D) l'orientation des fibres est influencée par une épaisseur de l'élément réduite par rapport à la taille des fibres. Il est admis que cette influence s'exerce pour une épaisseur inférieure à 3 fois la longueur L_f des plus longues fibres contribuant à assurer la non-fragilité.

Les essais de flexion quatre points sur plaques minces décrits ci-après conduisent à mesurer la flèche en fonction de l'effort appliqué. La méthode d'exploitation de ces essais décrite en E.4 permet, par analyse inverse, de déterminer une courbe équivalente de réponse du matériau en traction directe. Par cette analyse, le comportement multi-fissurant attendu est décrit par une loi contrainte-déformation, qui permet d'accéder à la limite du comportement linéaire, à la contribution des fibres comme renfort d'une section fissurée, et permet de déterminer la classe de comportement en traction (voir 4.4.3) en transformant conventionnellement la déformation en ouverture de fissure pour vérifier l'inégalité assurant un comportement suffisamment écrouissant. Pour cette transformation il est admis conventionnellement que l'ouverture de fissure est égale à la déformation multipliée par le minimum des 2/3 de l'épaisseur e de l'élément et de 2 fois la longueur L_f des fibres les plus longues contribuant à assurer la non-fragilité.

Les essais doivent être réalisés et exploités par séries d'un minimum de 6 éprouvettes du même type. En particulier la méthode décrite ci-après qui prévoit 6 éprouvettes par direction conduit à la détermination de deux lois de comportement correspondant aux directions X et Y.

L'analyse inverse permettant de déterminer le comportement post-pic en traction doit être appliquée sur la courbe moyenne et sur la courbe caractéristique issues de la série de résultats d'essais. Le domaine de validité de l'analyse (simplifiée ou non) et des courbes obtenues doit cependant être limité par sécurité à la plus petite valeur de la flèche correspondant au moment au pic obtenue pour chaque courbe de la série de résultats d'essais considérée.

E.2 Dimensions et préparation des éprouvettes

L'épaisseur e des corps d'épreuve doit être égale à celle de la structure concernée par la caractérisation, ou, si cette valeur n'est pas connue, à 3 fois la longueur L_f des plus longues fibres contribuant à assurer la non-fragilité.

Les corps d'épreuve doivent être des prismes prélevés par sciage dans quatre plaques carrées d'épaisseur e dont le mode de réalisation doit reproduire le mode de fabrication prévu pour la structure.

Pour des plaques coulées en BFUP de classe de consistance Ca et Cv, l'éprouvette doit être fabriquée en laissant le BFUP s'écouler à partir d'une extrémité du moule, l'écoulement étant favorisé par piquage uniquement pour les BFUP de classe de consistance Cv, le rechargement se faisant systématiquement en arrière du front. Pour ces classes de consistance, la vibration est interdite.

Pour des plaques coulées en BFUP de classe de consistance Ct une méthode de mise en œuvre répétable dérivée de celle employée pour l'ouvrage doit être définie.

Dans tous les cas le remplissage du moule par tas juxtaposés est interdit.

La longueur des prismes est $L_p = \min [20 e ; 60 \text{ cm}]$.

La largeur des prismes est $b = 8 L_f$.

La distance au bord est $d = \text{Max} [L_f ; 2 \text{ cm}]$.

Le côté des plaques est égal à $\text{Max} [L_p + 2d ; 26 L_f + 2d]$.

Les deux directions principales des plaques (axes X et Y) doivent être repérées ainsi que leur correspondance avec le mode de bétonnage. Trois prismes doivent être prélevés par sciage dans chaque plaque, selon les dimensions et l'implantation définies sur la Figure E.1. Deux séries de 6 prismes sont ainsi obtenues, l'une suivant l'axe X, l'autre suivant l'axe Y.

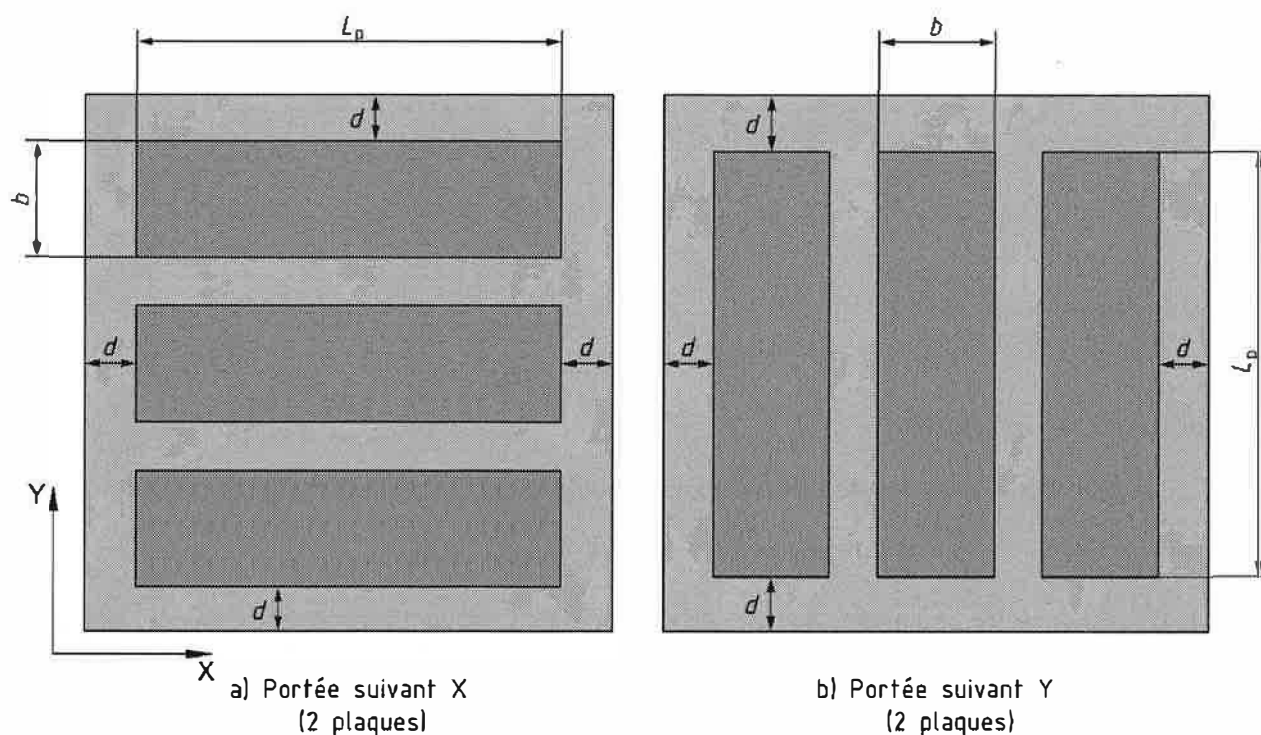
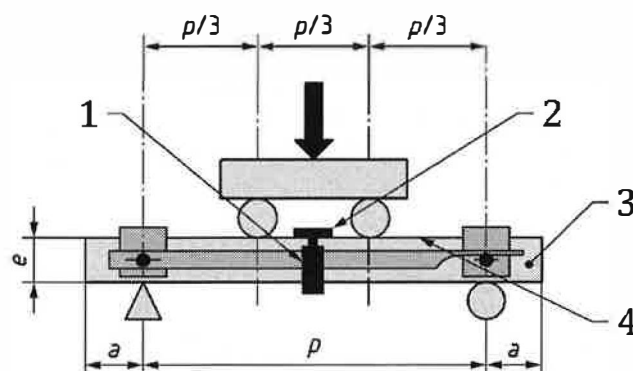


Figure E.1 — Plan de prélèvement des corps d'épreuve

NF P 18-470

E.3 Réalisation des essais

Les prismes doivent être testés en flexion circulaire (4 points), comme décrit sur la Figure E.2.



Légende

- 1 Capteur de déplacement
- 2 Plaque de renvoi collée, par exemple en aluminium
- 3 Éprouvette
- 4 Dispositif de mesure de flèche

Figure E.2 — Schéma de l'essai et principe de mesure de la flèche à mi-portée

$$a = \max (e/2 ; 3 \text{ cm}) ; p = Lp - 2 a$$

La machine d'essai doit être une presse de traction/compression pouvant être asservie en déplacement vérin ou sur un capteur externe. Le dispositif d'appui et d'application de la charge doit être composé d'un point fixe et de points mobiles (par exemple des appuis à rouleaux), pour limiter l'effort normal parasite. Les dalles doivent être instrumentées par deux capteurs de déplacement à mi-portée, situés de chaque côté du corps d'épreuve, sauf lorsque leur largeur est inférieure à 120 mm où il est admis d'utiliser un seul capteur au centre. Ces capteurs doivent être mis en place à l'aide d'un dispositif fixé sur l'éprouvette permettant de s'affranchir des tassements sur appui, comme indiqué sur la Figure E.2.

Selon le capteur retenu pour le pilotage de l'essai, la vitesse de chargement doit être adaptée :

- en pilotage vérin, on retiendra une vitesse de $(0,25 \pm 0,1) \text{ mm/min}$;
- en pilotage sur la flèche moyenne, on retiendra une vitesse de $(0,1 \pm 0,05) \text{ mm/min}$.

L'essai doit être poursuivi jusqu'à une flèche moyenne au moins égale à deux fois la flèche moyenne au pic, sans être inférieure à $e/2$.

L'enregistrement des données au cours de l'essai doit être effectué à une fréquence d'au moins 5 enregistrements par seconde. Les signaux à enregistrer sont :

- a) le temps ;
- b) la flèche moyenne ;
- c) la force ;
- d) éventuellement le déplacement du vérin.

E.4 Traitement des données

E.4.1 Détermination du comportement élastique

La détermination du module d'élasticité en flexion E doit s'effectuer dans le tiers central de la partie linéaire de la phase ascendante de la courbe moyenne moment-flèche obtenue à partir des n essais de la série ($n \geq 6$). La pente de la courbe dans cet intervalle doit alors être multipliée par le coefficient $(23.p^2)/(216.b.e^3/12)$, pour obtenir le module d'élasticité en flexion.

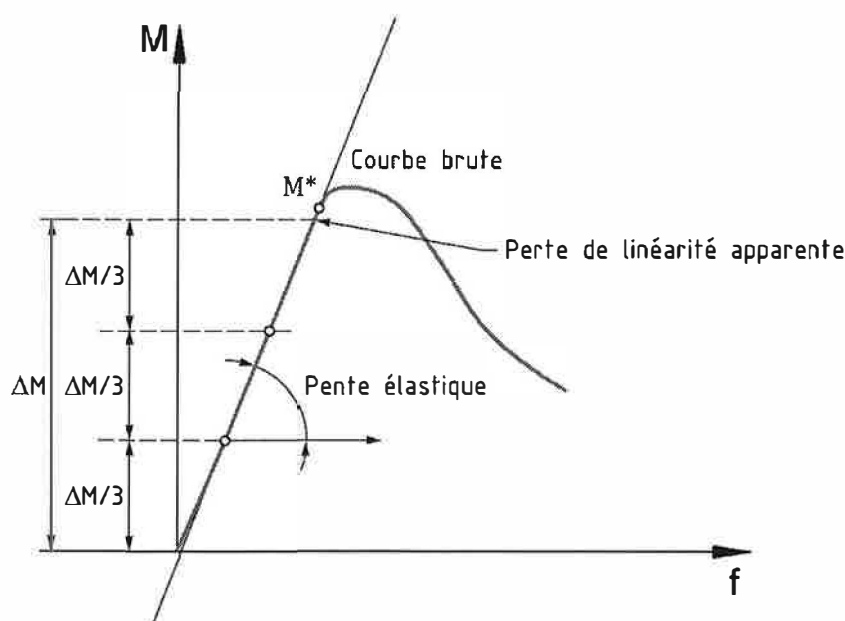


Figure E.3 — Détermination du comportement élastique

La limite d'élasticité $f_{ct,el}$ doit être déterminée pour chaque courbe Moment-flèche. On détermine visuellement l'amplitude du domaine linéaire ΔM puis on trace la droite passant par $\Delta M/3$ et $2\Delta M/3$, comme indiqué sur la Figure E.3. Le point M^* où la courbe expérimentale s'écarte de la droite est alors plus lisible. La valeur du moment correspondant à ce point de perte de linéarité doit être multipliée par $6/be^2$ pour obtenir la limite d'élasticité $f_{ct,el}$. Les valeurs moyennes et caractéristiques $f_{ctm,el}$ et $f_{ctk,el}$ se déduisent par le traitement statistique habituel (voir Annexe B). La courbe de calcul doit être obtenue par concaténation de la partie linéaire obtenue jusqu'à $f_{ct,el}$ et de la loi obtenue par analyse inverse selon E.4.2.

E.4.2 Méthode inverse point par point à partir de la courbe Moment-flèche

Au-delà de la limite d'élasticité, la courbe de comportement est identifiée à partir de la relation moment-courbure issue des résultats expérimentaux. En effet la relation entre la courbure χ et la flèche δ en régime élastique n'est plus valable lorsque le matériau devient non linéaire car la courbure augmente alors davantage que le moment. L'allure de la courbure en fonction de l'abscisse est donc modifiée comme indiquée sur la Figure E.4. Connaissant la courbe moment-flèche, on doit déduire la courbe moment-courbure en procédant par analyse inverse. On procède par récurrence.

NF P 18-470

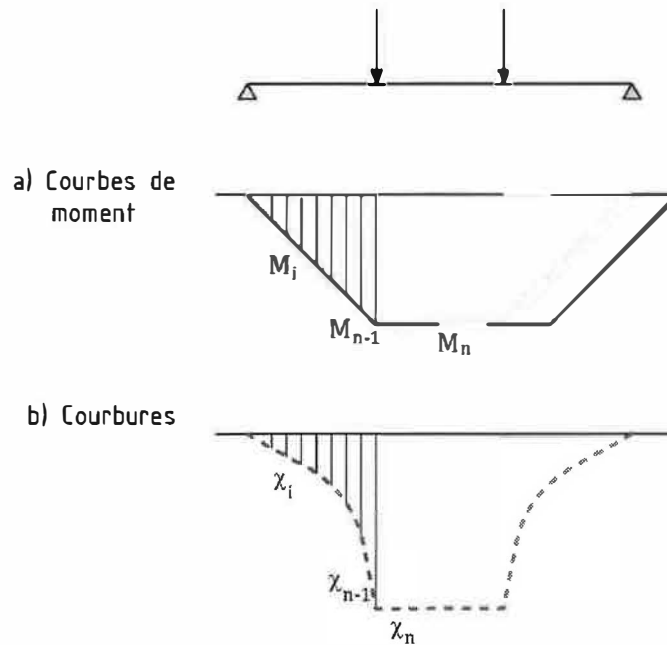


Figure E.4 — Courbes de moment et courbure après plastification

Pour un moment nul, la flèche et la courbure doivent être pris nuls. Pour un couple moment M_n – flèche δ_n donnés, si on suppose connues les courbures χ_i associées aux moments M_i , i allant de 1 à $n-1$, alors on doit déterminer la courbure χ_n pour obtenir la flèche δ_n (voir Figure E.4). Prenant l'ensemble des courbures χ_i , i de 1 à n , on intègre deux fois ces courbures pour obtenir la flèche. Une fois l'ensemble des couples M_i, χ_i obtenus, on procède à une deuxième analyse inverse pour déduire la loi contrainte déformation.

À chaque étape i , les données d'entrée sont un couple de valeurs M_i, χ_i . L'objectif est d'obtenir les valeurs ε_i de déformation en fibre inférieure ainsi que les contraintes σ_i associées. On doit de nouveau procéder par récurrence. À l'étape 0, $\varepsilon_0 = 0$ et $\sigma_0 = 0$. À l'étape n , on suppose connues les valeurs ε_i et σ_i pour $i=1$ à $n-1$ ainsi que le moment M_n et la courbure χ_n . En notant β_i la hauteur relative de l'axe neutre sous moment M_i , l'équation explicitant la variation linéaire de déformation conduit à la relation (E.1) :

$$\varepsilon_n = -\chi_n \beta_n \cdot e \quad (\text{E.1})$$

La nullité de l'effort normal permet d'écrire l'équation (E.2) :

$$N = N_c + N_t = \frac{1}{2}(1 - \beta_n)^2 e^2 \cdot b \cdot \chi_n \cdot E + \frac{1}{\chi_n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i) \cdot \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \cdot b = 0 \quad (\text{E.2})$$

À l'étape $n-1$, le terme N_c provenant de la zone comprimée peut s'écrire conformément à l'équation (E.3) :

$$N_c(n-1) = \frac{1}{2}(1 - \beta_{n-1})^2 e^2 \cdot b \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{n-1}}{\beta_{n-1} e} \right) \cdot E \quad (\text{E.3})$$

Toujours à l'étape $n-1$, le terme N_t provenant de la zone tendue vérifie la relation (E.4) :

$$N_t(n-1) = \left(-\frac{\beta_{n-1} \cdot e}{\varepsilon_{n-1}} \right) \cdot b \cdot \int_{\varepsilon_{n-1}}^0 \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = -\frac{1}{2} \frac{(1 - \beta_{n-1})^2}{\beta_{n-1}} e \cdot b \cdot (-\varepsilon_{n-1}) \cdot E \quad (\text{E.4})$$

À l'étape n , le terme $N_t(n)$ peut donc s'écrire grâce à l'expression (E.5) :

$$N_t(n) = \left(-\frac{\beta_n \cdot e}{\varepsilon_n} \right) \cdot b \cdot \int_{\varepsilon_n}^0 \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = -\frac{\beta_n \cdot e}{\varepsilon_n} \cdot b \cdot \int_{\varepsilon_{n-1}}^0 \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\beta_n \cdot e}{\varepsilon_n} \int_{\varepsilon_n}^{\varepsilon_{n-1}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (\text{E.5})$$

Qui peut encore s'écrire selon (E.6) :

$$-\frac{1}{2} \frac{(1-\beta_n)^2}{\beta_n} \cdot e \cdot b \cdot (-\varepsilon_n) \cdot E = \frac{1}{2} \frac{\beta_n}{\varepsilon_n} \cdot \frac{(1-\beta_{n-1})^2}{(\beta_{n-1})^2} \cdot (\varepsilon_{n-1})^2 \cdot e \cdot b \cdot E - \frac{\beta_n}{\varepsilon_n} \cdot \frac{\sigma_n + \sigma_{n-1}}{2} \cdot (\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n) \cdot e \cdot b \quad (\text{E.6})$$

De cette dernière équation, on peut déduire une relation directe entre σ_n et β_n , en utilisant le fait que ε_n s'obtient en fonction de $\varepsilon_{mes,n}$ ou χ_n et de β_n .

L'équation sur le moment donne quant à elle, à l'étape n , la relation (E.7) :

$$M = M_c + M_t = \frac{e^3}{3} \cdot (1-\beta_n)^3 \cdot b \cdot \chi_n \cdot E + \left(\frac{1}{\chi_n} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i) \frac{(2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}) \cdot \sigma_i + (2\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i) \cdot \sigma_{i-1}}{6} \cdot b \quad (\text{E.7})$$

M_n est donc fonction de σ_n , β_n et ε_n (ou χ_n). Or ε_n s'obtient à partir de $\varepsilon_{mes,n}$ ou χ_n et de β_n . σ_n étant fonction de β_n , l'équation sur le moment peut s'écrire directement comme l'expression de M_n en fonction de β_n , on a donc réduit la détermination des trois inconnues ε_n , σ_n et β_n à un problème à une équation et une inconnue.

Il est possible de fournir une description linéaire par morceaux de la courbe caractéristique du comportement en traction du BFUP issue des traitements ci-avant. Cette description revient à la donnée d'un jeu de valeurs de contraintes, tirées de la courbe, associées à des valeurs caractéristiques de déformations. Il est possible d'effectuer la représentation simplifiée similaire pour la courbe moyenne. Les valeurs de contrainte associées à ces représentations simplifiées doivent être déterminées à 0,1 MPa près.

En particulier, la description bilinéaire de la courbe caractéristique déterminée par la limite d'élasticité $f_{ctf,el}$ associée à la déformation ε_{el} , et la résistance post-fissuration $f_{ctf,k}$ associée à la déformation maximale ε_{lim} est à la base de la loi conventionnelle de calcul dite « loi 2 » définie au 3.1.7.3.3 de la norme NF P 18-710:2016, la partie post-fissuration étant ensuite divisée par le facteur d'orientation K en application de l'Annexe F du présent document, et la loi ELU étant obtenue par affinité d'un facteur $1/\gamma_{cf}$.

E.4.3 Représentation simplifiée

Pour des pièces soumises à une flexion simple ou à une combinaison flexion – compression, à l'exclusion de toute résultante moyenne de traction dans la section, il est admis de simplifier la loi de comportement qui serait obtenue par application de E.4.1 et E.4.2, tant pour la loi moyenne que pour la loi caractéristique, selon la courbe représentée sur la Figure E.5.

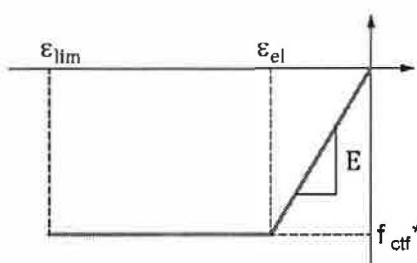


Figure E.5 — Loi simplifiée

NF P 18-470

Le module d'élasticité E utilisé doit être déterminé selon E.4.1., la limite de déformation élastique ε_{el} doit être déduite de la détermination de la contrainte limite post-fissuration f_{ctf}^* selon ce qui suit.

L'analyse inverse simplifiée décrite ci-après doit être menée en conservant la relation élastique (E.8) entre la courbure χ en m^{-1} dans la zone de moment constant, la flèche δ en m et la portée p en m :

$$\delta = \frac{23}{216} \chi p^2 \quad (E.8)$$

f_{ctf}^* ainsi que ε_{lim} doivent être calculés à partir des états de déformation et de contrainte obtenus sous le moment M maximum de la courbe considérée (Figure E.6) :

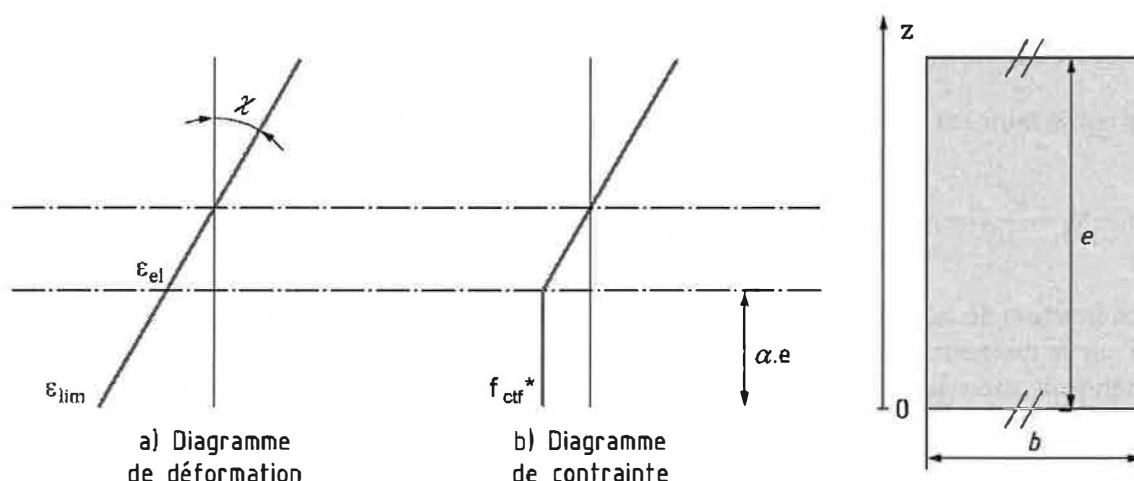


Figure E.6 — Distribution des déformations et contraintes avec la loi simplifiée

On exprime les contraintes en fonction de la hauteur z , de la hauteur fissurée $\alpha.e$ et de f_{ctf}^* selon les équations (E.9) et (E.10) :

$$\sigma(z) = f_{ctf}^* \quad \text{si } 0 \leq z \leq \alpha.e \quad (E.9)$$

$$\sigma(z) = f_{ctf}^* + (z - \alpha.e) \cdot \chi \cdot E \quad \text{si } \alpha.e \leq z \leq e \quad (E.10)$$

L'effort normal N et le moment fléchissant M peuvent s'écrire respectivement suivant les expressions (E.11) et (E.12) :

$$N = b.e.f_{ctf}^* + \frac{1}{2} b.(1-\alpha)^2 .e^2 \chi.E \quad (E.11)$$

$$\text{et } M = b.\frac{e^2}{2}.f_{ctf}^* + b.\left(\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha^3}{6}\right).e^3 \chi.E \quad (E.12)$$

Sachant que $N = 0$, on aboutit à l'équation (E.13) :

$$M = \left(2\alpha^3 - 3\alpha^2 + 1\right) \cdot \frac{b.e^3 \chi.E}{12} \quad (E.13)$$

Connaissant M et χ , on déduit α , d'où l'on tire les relations (E.14) et (E.15) :

$$f_{ctf}^* = -\frac{1}{2}(1-\alpha)^2 \cdot e \cdot \chi \cdot E \quad (\text{E.14})$$

$$\text{et } \varepsilon_{\text{lim}} = -\chi \cdot \alpha \cdot e + \frac{f_{ctf}^*}{E} \quad (\text{E.15})$$

La détermination de f_{ctf}^* doit être donnée à 0,1 MPa près.

Annexe F (normative)

Détermination des facteurs d'orientation K à partir des essais de traction par flexion

F.1 Introduction

Par comparaison à une situation où les fibres seraient idéalement distribuées de façon aléatoire et isotrope dans l'ouvrage de façon à assurer la même reprise d'effort de traction post-fissuration que dans les éprouvettes moulées de caractérisation, les facteurs d'orientation K , déterminés en épreuve de convenance, permettent de prendre en compte dans le calcul la distribution et l'orientation effectives des fibres dans la structure réelle.

La partie non-linéaire de la courbe de réponse expérimentale obtenue sur éprouvettes moulées (déterminée par application de l'Annexe D ou de l'Annexe E selon la géométrie des éléments du projet) doit être multipliée par le rapport $1/K$, un raccordement linéaire illustré Figure F.1 étant réalisé si nécessaire entre la partie linéaire du comportement et le maximum de la partie non-linéaire (résistance post-fissuration, notée f_{ctf}) pour éliminer un artefact lié à un minimum local. À défaut de maximum local pour la partie non linéaire le raccordement doit être effectué en plafonnant la contrainte à la valeur f_{ctf} prise conventionnellement comme celle correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 millimètre.

C'est cette courbe qui doit servir de référence à la courbe de calcul aux états limites de service et, divisée par le coefficient partiel relatif au BFUP tendu γ_{cf} , à la courbe de calcul aux états limites ultimes.

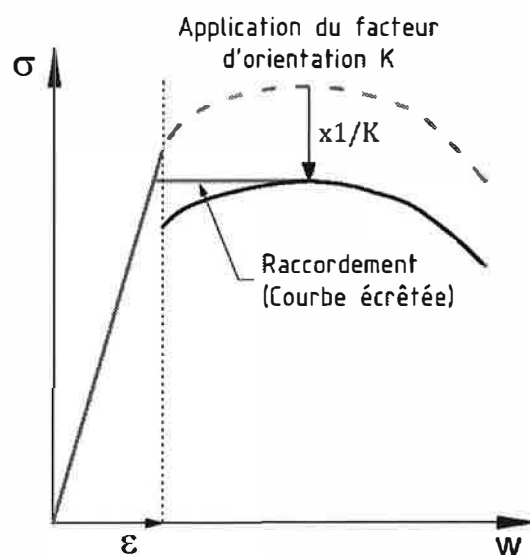


Figure F.1 — Application du facteur d'orientation K

Les facteurs d'orientation K doivent être obtenus par comparaison entre le moment résistant de plaques ou prismes prélevés dans l'ouvrage par rapport à celui de plaques ou de prismes moulés de mêmes dimensions, issus de la même fabrication en épreuve de convenance ; ils sont déterminés par référence à une direction principale de traction dans l'ouvrage et sont associés à une partie d'ouvrage homogène en termes de mise en œuvre et orientation des fibres (âme, hourdis, talon, zone d'ancrage ...).

F.2 Modalités de détermination

L'épreuve de convenance doit comprendre la détermination des facteurs d'orientation K à partir de l'élément témoin représentatif visé en 7.3 du présent document, selon un plan de prélèvement mis au point et approuvé conjointement par le prescripteur, l'utilisateur de BFUP, le maître d'œuvre et le responsable des études d'exécution. Ce plan de prélèvement doit tenir compte des directions des efforts internes de traction auxquels peut être soumis l'ouvrage. L'élément témoin doit permettre de prélever au minimum 6 plaques ou prismes par partie d'ouvrage et par direction pertinente d'efforts de traction, de même géométrie que les éléments moulés (en nombre égal) associés à la caractérisation du comportement en traction selon l'Annexe D ou l'Annexe E selon la géométrie des éléments du projet. Ces éprouvettes (généralement prélevées par sciage) doivent être testées conformément à l'Annexe D ou à l'Annexe E du présent document selon leur épaisseur relative par rapport à la taille des plus longues fibres contribuant à assurer la non-fragilité. Les faces latérales des éléments testés doivent être toutes les deux sciées ou toutes les deux coffrées. Les corrections indiquées en D.6 doivent être appliquées à l'ensemble des résultats.

Par direction et par partie d'ouvrage considérée, on note K_{global} le rapport entre la moyenne des pics des courbes moment-flèche obtenues sur éprouvettes moulées et la moyenne des pics des courbes moment-flèche obtenues sur plaques ou prismes sciés.

Par direction et par partie d'ouvrage considérée, on note K_{local} le rapport entre la moyenne des pics des courbes moment-flèche obtenues sur éprouvettes moulées et la plus faible valeur des pics des courbes moment-flèche obtenues sur plaques ou prismes sciés.

Dans tous les cas, on impose pour K_{global} comme pour K_{local} une valeur minimale de 1,0 et une valeur maximale de 2,0 pour K_{global} et de 2,5 pour K_{local} .

Lorsqu'une vérification mettant en œuvre le comportement en traction ne concerne pas une seule direction, on peut adopter une valeur unique du facteur d'orientation K indépendamment de la direction de traction considérée, on doit alors prendre le maximum des valeurs de K obtenues dans les différentes directions pertinentes pour une partie d'ouvrage donnée.

À un stade d'études préliminaires, faute de disposer de données probantes dans la carte d'identité du BFUP considéré, on peut adopter les valeurs suivantes :

$$K_{global} = 1,25$$

$$K_{local} = 1,75$$

Annexe G (normative)

Maîtrise de la production des pré-mélanges de constituants

Un pré-mélange de constituants destiné à la production de BFUP doit être produit sous assurance de la qualité et cette production doit faire l'objet d'un contrôle interne par le fournisseur du pré-mélange. La procédure doit comprendre :

- a) un contrôle des constituants entrant dans la composition du pré-mélange, sur la base des fiches techniques produits régulièrement mises à jour, complété périodiquement par des essais à réception ;
- b) un contrôle du respect de la régularité de composition du pré-mélange conformément aux objectifs indiqués en 5.1.10 ;
- c) un contrôle sur prélèvements du pré-mélange produit, décrit ci-après ;
- d) la définition des actions correctives en cas d'écart.

Une campagne de production est une période de production d'un type de pré-mélange, pendant laquelle aucun autre type de pré-mélange ne doit être réalisé. Elle peut être constituée de la succession de plusieurs opérations de production de pré-mélange (dont le volume dépend du mélangeur utilisé). Chaque lot de pré-mélange doit être identifié par un code permettant d'en établir la traçabilité. Cette traçabilité doit rattacher le lot à la campagne de production au cours de laquelle il a été produit, et aux opérations de production à l'intérieur de cette campagne.

Le nombre de prélèvements pour contrôle à réaliser sur le pré-mélange doit être déterminé en fonction du nombre d'opérations de production au cours d'une campagne de production, quel qu'en soit le volume. La première opération d'une campagne de production doit systématiquement faire l'objet d'un prélèvement pour contrôle. En contrôle normal, les prélèvements doivent être répartis régulièrement dans la campagne comme indiqué au Tableau G.1. Le niveau de contrôle peut être réduit ou renforcé par rapport à ce niveau normal, par application de l'Annexe D de la norme NF EN 13369:2013.

Tableau G.1 — Prélèvements pour contrôle de production

Nombre d'opérations de la campagne de production	1	2 - 9	10 - 19	20 - 29	30 - 39	40 - 79	≥ 80
Nombre de prélèvements pour contrôle	1	2	3	4	5	8	1 tous les 10 mélanges

Les contrôles doivent être réalisés sur un matériau de contrôle qui doit dériver d'un des BFUP obtenus à partir du pré-mélange et disposant d'une carte d'identité (voir 5.1.10). La composition, le protocole de fabrication et la procédure d'essai du matériau de contrôle doivent être définis dans le manuel qualité du producteur du pré-mélange. La composition du matériau de contrôle doit comprendre le pré-mélange objet des prélèvements, ainsi que les constituants nécessaires à la réalisation des essais sur le matériau frais et durci dans les conditions décrites dans le manuel qualité.

Chaque prélèvement de pré-mélange doit être conditionné hermétiquement et référencé et faire l'objet d'une fabrication de matériau de contrôle en une gâchée unique. Cette gâchée doit être utilisée pour réaliser les mesures suivantes, suivant des modalités décrites au manuel qualité :

- contrôle de la consistance ;
- contrôle de la résistance à la compression conformément à l'Annexe C du présent document.

NF P 18-470

Les valeurs cibles et tolérances sur les résultats de ces contrôles doivent permettre de présumer l'atteinte régulière des performances décrites dans la carte d'identité du BFUP dont dérive le matériau de contrôle par référence aux essais visés en 5.4.1 et 5.4.2.

Des contrôles de teinte, d'élévation de température en cours de malaxage, de densité du matériau de contrôle frais ou de temps de prise peuvent compléter les essais réalisés sur certains des prélèvements. Les délais d'obtention des résultats des contrôles doivent être compatibles avec la mise à l'écart avant livraison des lots qui ne respecteraient pas les valeurs cibles.

À partir de chaque prélèvement effectué pour contrôle, un échantillon conservatoire doit par ailleurs être réalisé par le fournisseur du pré-mélange et conservé au minimum 6 mois dans les conditions usuelles de stockage.

Le système qualité du fournisseur de pré-mélange doit permettre d'isoler un lot qui ne respecterait pas les valeurs cibles de ce système, soit au stade des pesées, soit au stade des contrôles sur prélèvement de BFUP. Si les investigations complémentaires ne lèvent pas l'écart, le lot non conforme doit être exclu de toute éventuelle réutilisation dans la chaîne de production du pré-mélange.

Le contrôle interne associé à la production de pré-mélanges de constituants destinés à la production de BFUP peut être complété par un contrôle par tierce partie.

Annexe H **(informative)**

Comportement à haute vitesse de sollicitation

La résistance au choc du BFUP, associée à l'augmentation instantanée de résistance de la matrice cimentaire avec la vitesse de sollicitation, et à la dissipation d'énergie par les fibres en phase de microfissuration (qui augmente également avec la vitesse de sollicitation), peut constituer une propriété utile voire critique selon les projets. Lorsque la méthode de calcul au choc employée (calcul statique équivalent, calcul dynamique explicite, ...) fait appel à une résistance instantanée sous sollicitation s'exerçant à haute vitesse, il peut être nécessaire de caractériser cette propriété par des essais de traction, de compression ou de flexion à haute vitesse en phase d'étude, à moins d'en disposer dans la carte d'identité du matériau.

L'exploitation des résultats de ces essais peut permettre de calibrer l'évolution, avec la vitesse de sollicitation, de la résistance (par exemple par un rapport des résistances égal à une puissance du rapport des vitesses de chargement, ou par l'augmentation supposée linéaire de la résistance ou de la contrainte post-pic en traction avec la vitesse de chargement, en échelle semi-logarithmique) ou du critère de rupture du BFUP (dans le cas d'un modèle de plasticité avec écrouissage visqueux, par exemple). La norme NF P 18-710:2016 donne des informations sur les méthodes de calcul au choc et les valeurs de calcul décrivant l'évolution des caractéristiques mécaniques avec la vitesse de sollicitation utilisables pour le projet.

Annexe I (informative)

Essai d'abrasion hydraulique

I.1 Principe et expression des résultats

L'essai représentatif de l'effet de l'abrasion par des eaux chargées en alluvions, consiste à soumettre à un jet d'eau chargé en sable incliné à 45°, trois éprouvettes du BFUP à tester, encadrées par deux plaques de verre de $(24,5 \pm 0,5)$ mm d'épaisseur.

NOTE Ces plaques servent de référence pour tenir compte des modifications apportées par l'usure du sable et de la buse d'injection.

Dans la pratique, il convient que les éprouvettes de BFUP soumises à cet essai aient une épaisseur minimale de 30 mm et soient constituées de plaques d'au minimum 100 mm de côté ou de cylindres de diamètre minimal 100 mm. La surface exposée est la surface plane coffrée du fond de moule. Les essais sont réalisés à 28 jours sauf pour les BFUP de type TT2 ou TT1+2 pour lesquels ils sont réalisés après traitement thermique.

La durée de l'essai est de (75 ± 1) min. Les empreintes créées par le jet dans 3 corps d'épreuve du BFUP à tester sont comparées aux empreintes obtenues dans des éprouvettes de verre servant de référence, ce qui permet de déterminer l'indice d'abrasion :

$$I = V / V_0$$

V_0 = volume moyen des empreintes sur le verre

V = volume moyen de l'empreinte sur le BFUP

L'eau du bassin A est aspirée par la pompe B, envoyée vers la buse C (3,0 bars).

Le sable stocké en D est aspiré par le passage de l'eau en E, se mélange à celle-ci et le mélange eau + sable passe dans la buse C et frappe l'éprouvette F sous un angle de 45°.

L'éprouvette F est supportée et positionnée à l'aide d'un rail de guidage G.

Le sable redescend en D à travers une grille et l'eau est décantée dans un bassin H placé au côté du bassin A et s'y déversant.

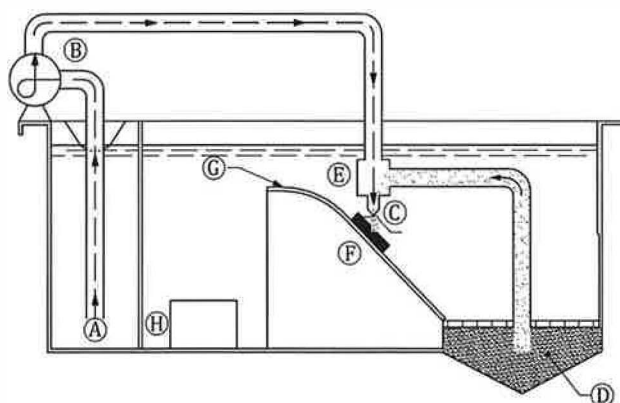


Figure I.1 — Principe de fonctionnement de la machine d'abrasion

NF P 18-470

I.2 Fonctionnement du banc d'essai

Le banc d'essai d'abrasion, dont le schéma est représenté en Figure I.1, fonctionne comme suit :

- a) l'éprouvette est immergée dans un bassin. Sa surface est attaquée à environ 45° par un jet d'eau chargée de sable ;
- b) l'injecteur qui donne naissance au jet est lui-même immergé, il comprend :
 - 1) une buse centrale de diamètre (20 ± 2) mm située à une distance de (62 ± 2) mm de l'éprouvette alimentée en eau par une pompe à la pression de 3,0 bars ;
 - 2) une arrivée latérale de sable, le sable en suspension dans l'eau étant aspiré par le jet issu de la buse centrale par effet vortex ;
 - 3) le sable servant à l'usure est un sable siliceux très pur ($\text{SiO}_2 \geq 97 \%$), dont 95 % des grains sont compris entre 1,0 mm et 4,0 mm de diamètre. Il convient de renouveler le sable lorsque le volume de l'empreinte sur le verre est réduite à $(60 \pm 5) \%$ du volume initial obtenu avec du sable neuf ;
- c) le sable retombe au fond du bassin où il est repris par aspiration et revient à l'injecteur ;
- d) le volume de chaque empreinte est mesuré par photogrammétrie ; il convient que les deux mesures successives faites sur chaque échantillon ne diffèrent pas de plus de 5 %. Dans le cas contraire, l'essai est annulé, les causes de l'écart sont recherchées, identifiées et traitées et l'essai est répété.

Il convient que le verre de référence ait une épaisseur de $(24,5 \pm 0,5)$ mm, une masse volumique comprise entre 2 400 kg/m³ et 2 600 kg/m³, et une dureté Knoop d'environ 500.

Bibliographie

- [1] *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*, Recommandations. AFGC (édition révisée, juin 2013).
- [2] NF EN 13670/CN, *Exécution des structures en béton — Complément national à la NF EN 13670:2013*.
- [3] Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, LCPC, août 2007.
- [4] Guides préparés par l'Ecole Française du Béton (2010-2012) et disponibles sur le site <http://www.efbeton.com/site/publications/bibliographie> :
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages de bâtiment coulés en place ou préfabriqués* »
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton* »
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages maritimes et fluviaux* »
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'équipement de la route* »
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés* »
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des tranchées couvertes, galeries, casquettes et caissons immergés* »
 - « *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages divers de génie civil* »
- [5] Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, AFGC, 2004.
- [6] Méthode d'essais des LPC n°66, Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne. Essai de performance, *Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées*, LCPC (2007).
- [7] RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures - Modeling and applications. Part 1: Introduction — General presentation, *Materials and Structures*, **40**(9), 841-853 (2007).
- [8] RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Recommendations. Part 3: Compressive strength for service and accident conditions, *Materials and Structures*, **28**(7), 410-414 (1995).
- [9] RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Recommendations. Part 5: Modulus of elasticity for service and accident conditions, *Materials and Structures*, **37**(2), 139-144 (2004).
- [10] RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Recommendations. Part 6: Thermal strain, *Materials and Structures*, **30**(Issue 1 – Supplement), 17-21 (1997).
- [11] RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Recommendations. Part 7: Transient creep for service and accident conditions, *Materials and Structures*, **31**(5), 290-295 (1998).

