

Les spécificités du matériau BFUP

Par : Stéphane LAURAND – Arcadis et Florian CHALENCON – Sigma Béton

Contraintes techniques imposées dans le DCE

- À chaque fois que cela est possible nous avons défini des objectifs et laissé au titulaire le choix des méthodes et de la formulation :

Prescriptions du CCTP	À l'initiative du titulaire
Caractère T3, retrait faible, porosité, $f_{ctk,el}$, ... (interfaces calculs fortes)	Formulation exacte
Détail de la reprise de bétonnage	Nombre exacte de levées, position des reprises
Références aux normes 18-470, 18-451, ...	Fabrication chantier ou centrale à béton
Épreuve de convenance avec $\frac{1}{4}$ d'embase sur 1 m de haut	Méthode de mise en œuvre (pompé, gravitaire, ...) Méthode de malaxage

Contraintes techniques imposées dans le DCE

- Exigences fortes sur le BFUP :
 - BFUP 150/165
 - $f_{ctk,el} > 9 \text{ MPa}$
 - Loi de comportement de type T3 (**très écrouissante**)
 - Pourcentage minimum de fibres : **2.5%**
 - **Porosité limitée à DP+** (porosité à l'eau à 90 jours $\leq 6,0 \%$)
 - Résistance à l'abrasion niveau RM1
 - **Retrait total** $< 0.8 \text{ mm/m}$

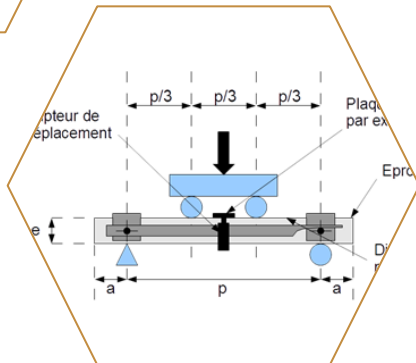
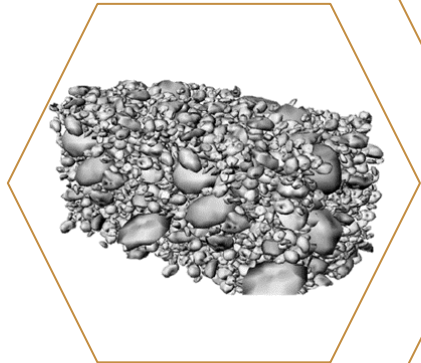
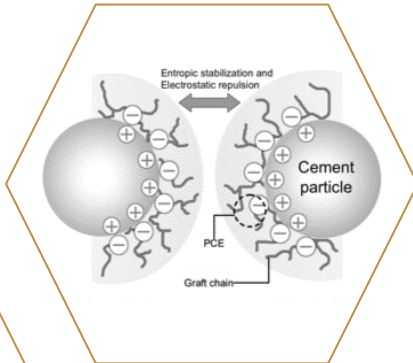
Béton Fibré à Ultra hautes Performances

DÉFINITION

- Matériau cimentaire à structure micrométrique
- Dosage élevé en ciment et en adjuvants
- Des granulats de faible dimension
- Une porosité réduite
- Durabilité et une résistance exceptionnelle
- 130 à 250 MPa en compression
- 20 à 50 MPa en traction par flexion
- Fortement dosé en microfibre
- Capacité de reprise d'effort post fissuration (comportement pseudo ductile permettant parfois de se passer d'armatures passives)



Principe de Formulation des BFUP



1. RÉDUCTION DRASTIQUE DE LA TENEUR EN EAU

- Moins d'eau = plus de performance
- $E/C \sim 0,15$ (Béton tradi. $E/C = 0,3$ à $0,4$)
- Chimie des super-plastifiants
- Amélioration de la compacté

2. OPTIMISATION DE LA STRUCTURE GRANULAIRE

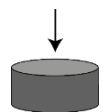
- Compacité maximale / modèles d'empilement granulaire
- Granulats de taille réduite (réduction des imperfections naturelles)
- Granulats de hautes performances mécaniques (Sables siliceux)

3. UN DOSAGE ÉLEVÉ EN MICROFIBRE

- Compense le caractère intrinsèquement « fragile » de la matrice cimentaire
- Capacité de reprise d'efforts post-fissuration
- Substitution des armatures passives
- Dosage jusqu'à 3,75% du volume

Les Bénéfices des BFUP

MÉCANIQUE



Résistance en compression 5 à 8 fois supérieure à un béton traditionnel



Limite élastique en traction supérieure à 6MPa

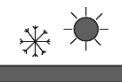


Comportement ductile, reprise d'effort post fissuration

DURABILITÉ



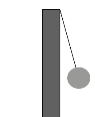
Imperméabilité à l'eau et résistances aux agressions chimiques



Insensibilité aux cycles gel/dégel



Matériau incombustible M0

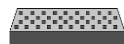


Résistance aux chocs et à l'abrasion (essais CNR)

ESTHÉTIQUE



Possibilité de moulage de formes complexes



Personnalisation possible de la texture

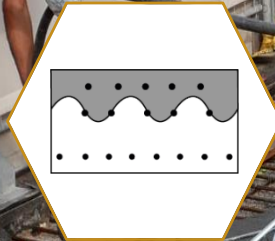


Matériau teintable dans la masse par ajout de pigments

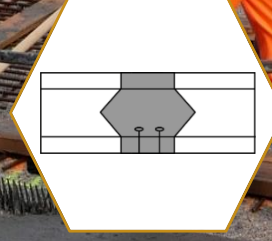


Applications – Génie Civil

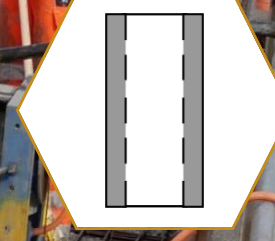
- Performances mécaniques élevées
- Comportement ductile en couche mince
- Réduction des poids / sections
- Durabilité des ouvrages



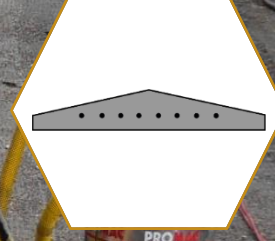
Renforcement de tablier béton



Joints de clavage



Chemisage/coques



Dalles légères/platelages



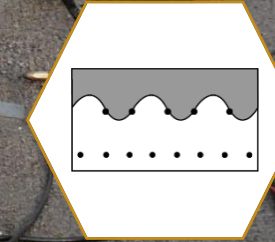
Poutres et béquilles



Protection ouvrages hydrauliques



Voussoirs structures neuves



Étanchéité

Normes Françaises

DEPUIS 2002

Recommandations AFGC

DEPUIS 2013

Recommandations AFGC révisées (EC2)

DEPUIS 2016

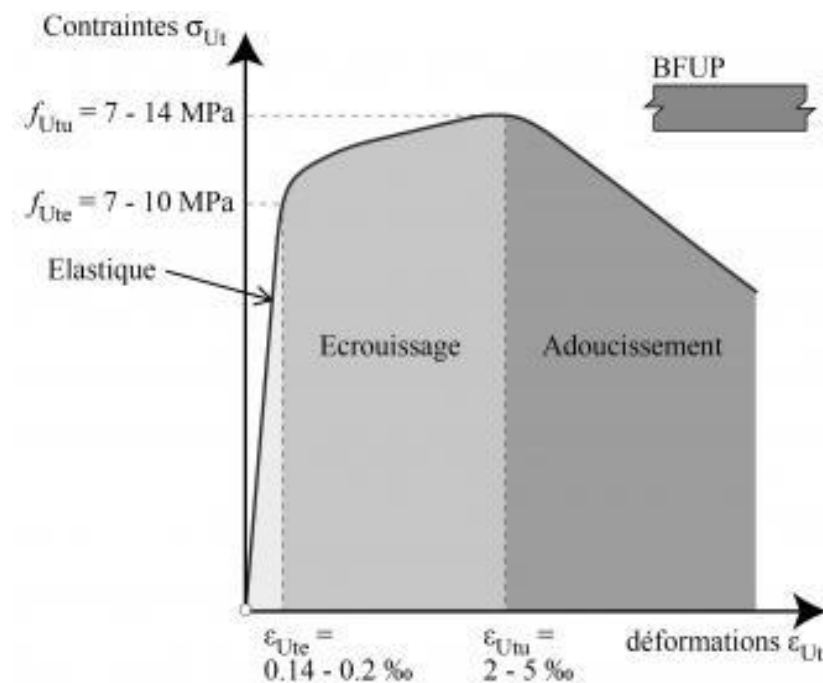
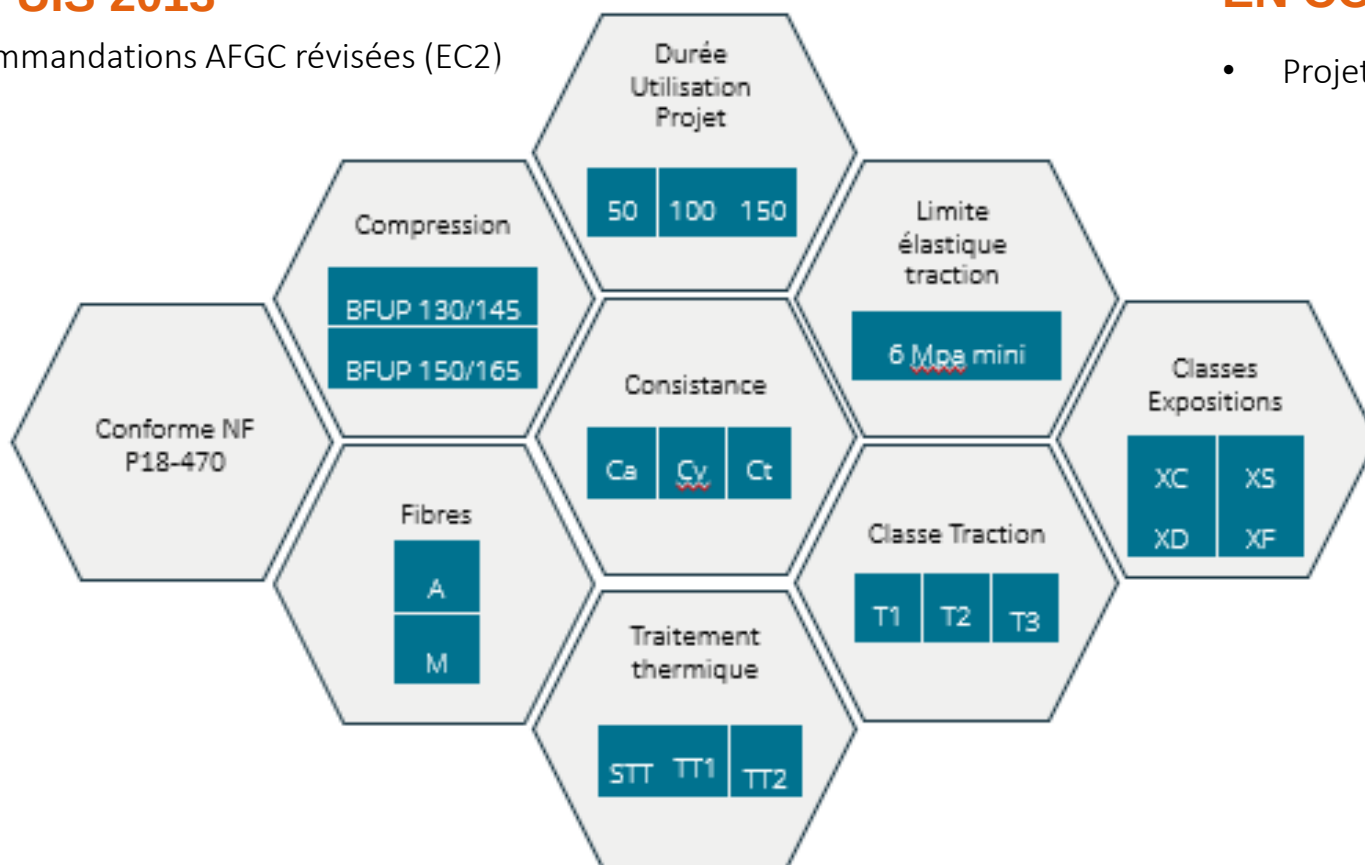
- NF P18-710 : Dimensionnement
- NF P18-470 : Matériaux

DEPUIS 2018

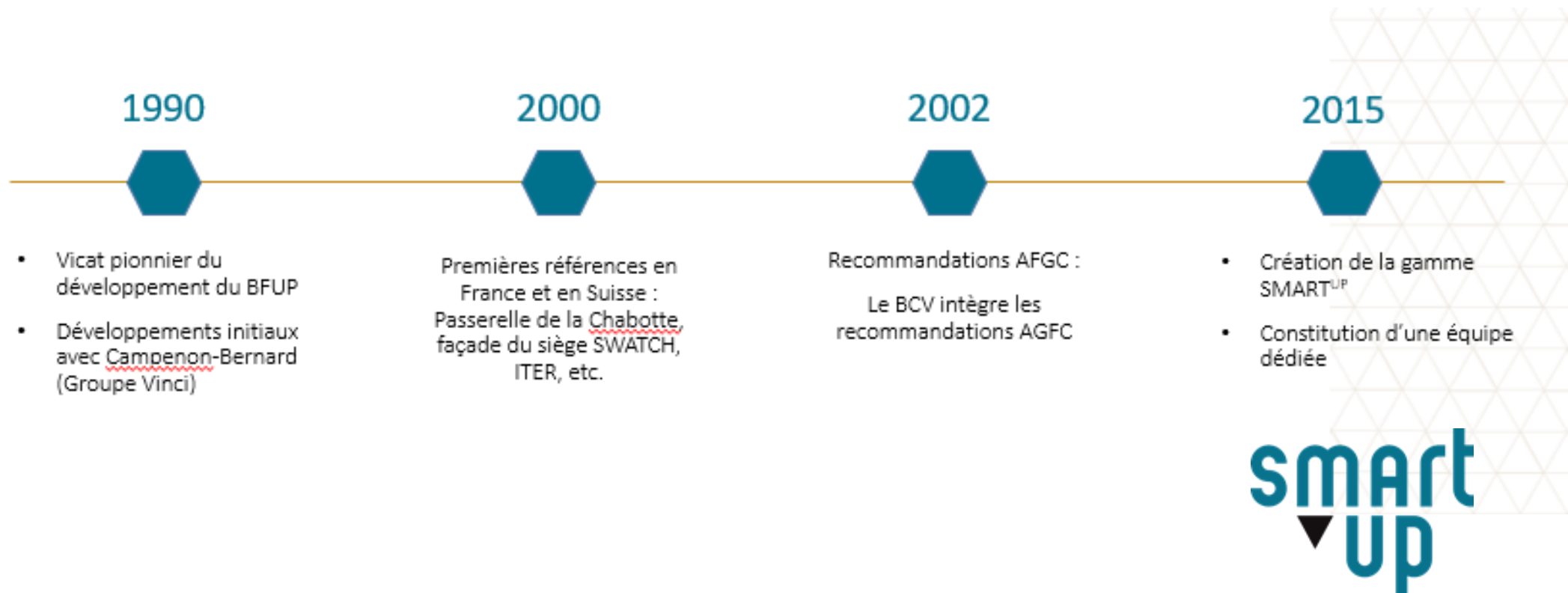
- NF P18-451 : Exécution

EN COURS

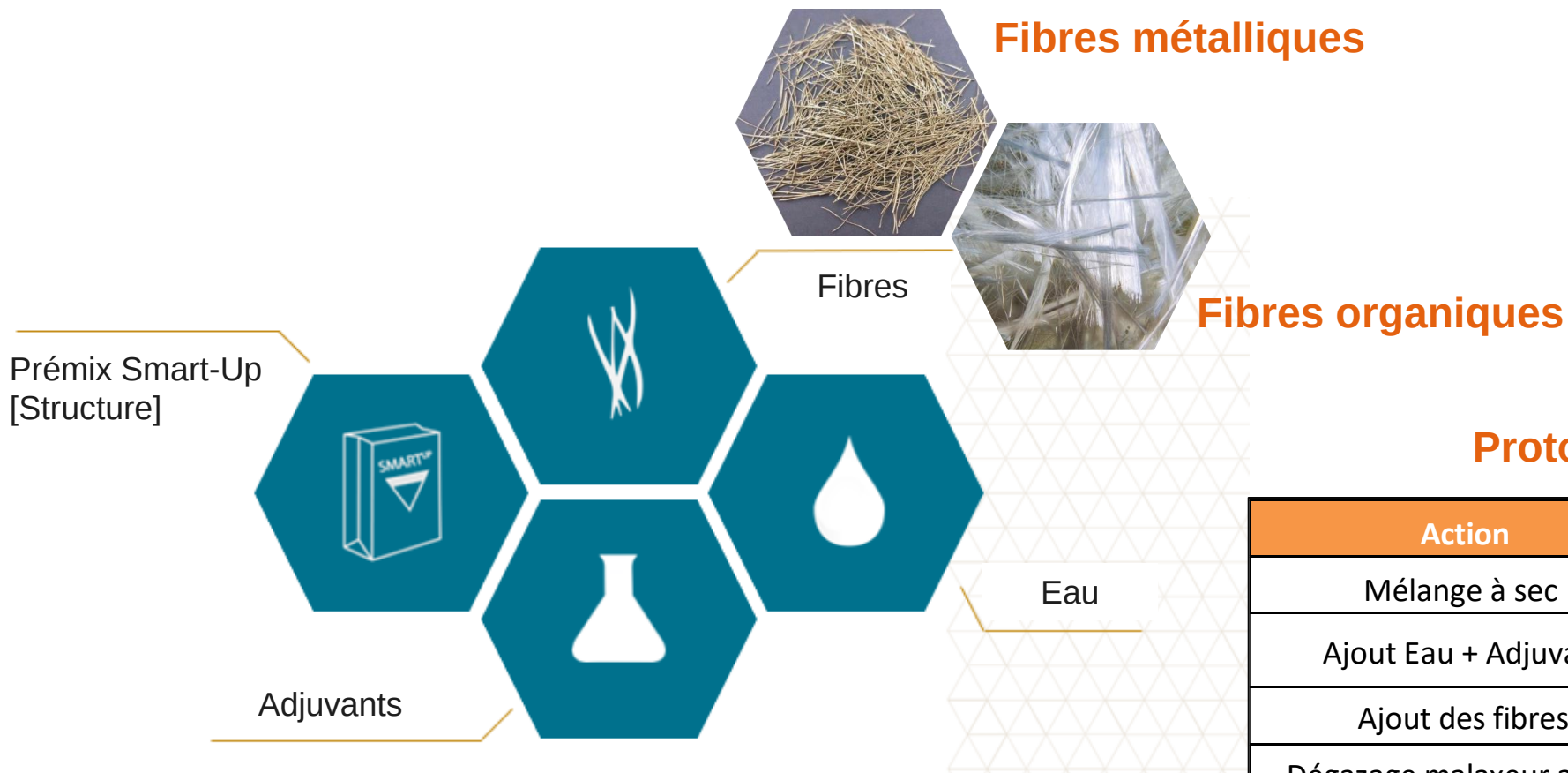
- Projet de normalisation européenne



Smart Up – le BFUP par Vicat



Les BFUP - Constitution



Protocole de fabrication

Action	Temps	Temps écoulé
Mélange à sec	1 min	1 min
Ajout Eau + Adjuvant	6 à 8 min	7 à 9 min
Ajout des fibres	8 min	15 min minimum
Dégazage malaxeur arrêté	2 min	17 min minimum

La fabrication est réalisée avec un malaxeur spécifique BFUP

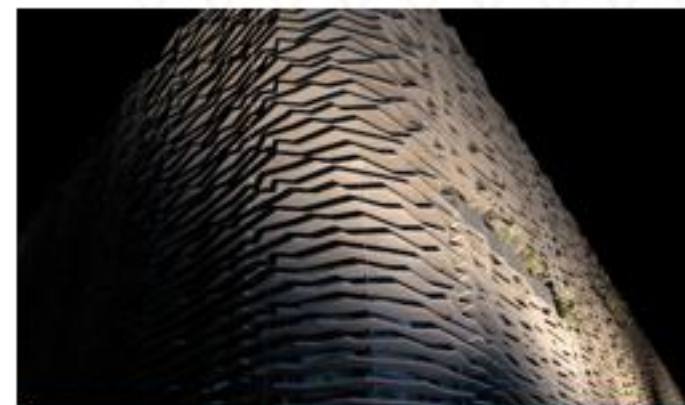
Smart-Up [Structure] Gris 2,5% FM



- $R_c (f_{ck})$: 150 MPa (sans TT, Ø11x22)
- Environ 40 MPa à 16h
- Limite élastique à la traction ($f_{ct,el}$) : 8,5 MPa
- Résistance à la traction (f_{ctk}) : 7,5 MPa
- Module d'élasticité (E_{cm}) : 50 Gpa
- Classe de traction : T1
- Retrait total : $\leq 500 \mu m.m^{-1}$



- Eau / liant : 0,15
- Porosité à l'eau $\leq 6\%$
- Très faible perméabilité au gaz: $K < 10^{-14}$
- Pas de carbonatation ni de pénétration de chlorures ($\leq 0,1 \cdot 10^{-12} m^2/s$).
- Dn+, Dc+ et DG+ selon NF P 18-470

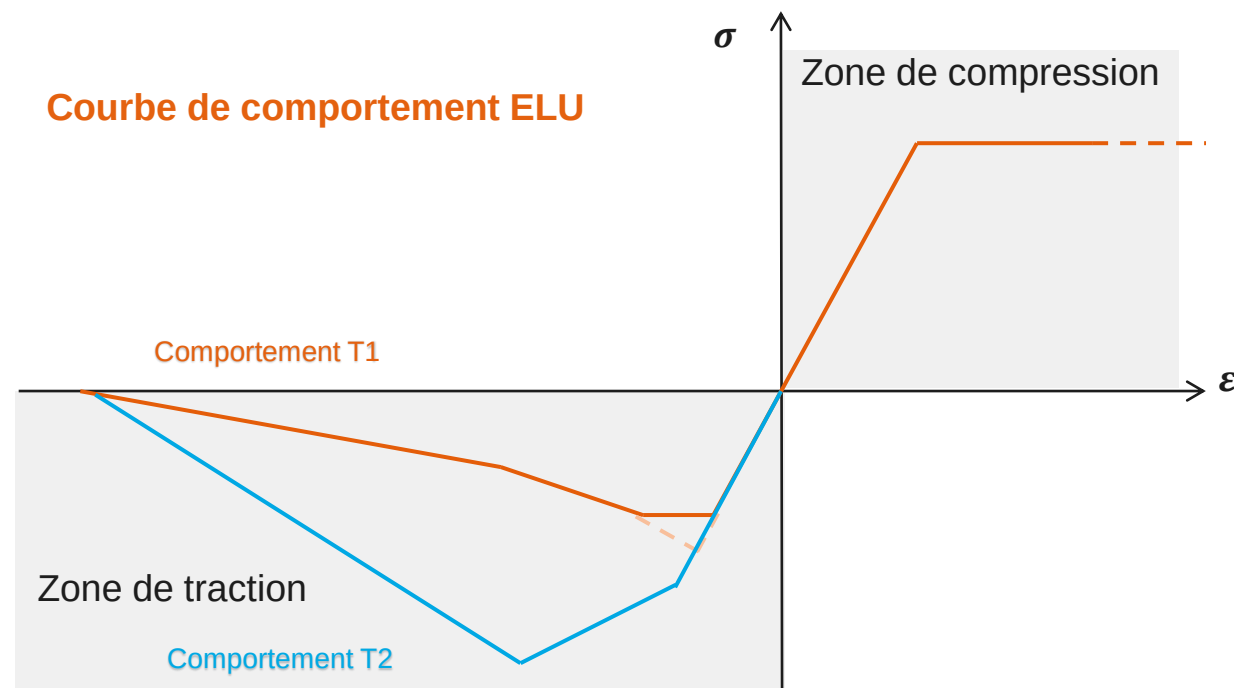


- Comportement auto-plaçant (Ca)
- Excellente résolution du démoulage
- Des parements homogènes

Smart-Up [Structure] Gris 2,5% FM et 3,75% FM

Propriétés Mécaniques	Valeurs	
	2,5% FM	3,75% FM
Résistance caractéristique en compression (f_{ck}) (<i>éprouvettes</i> Ø11x22cm selon NF EN 12390-3)	150 MPa	150 MPa
Valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction ($f_{ctk,el}$) (selon NF P 18-470 éprouvettes 7x7x28cm)	8,5 MPa	9,5 MPa
Valeur caractéristique de la résistance post-fissuration (f_{ctfk}) (selon NF P 18-470 éprouvettes 7x7x28cm)	7,5 MPa	11,4 MPa
Classe de comportement en traction	T1	T2
Valeur moyenne du module d'Young (E_{cm}) (selon NF EN 12390-13 éprouvettes Ø11x22cm)	50,0 GPa	50,0 GPa
Coefficient de Poisson	0,2	0,2

Courbe de comportement ELU



Schématisme des lois de comportement simplifié. (valeurs amplifiées pour illustrer la différence de comportement entre T1 et T2)

Caractéristiques du BFUP sur ouvrage

Notion de K_{global} K_{local}

Carte d'identité d'un BFUP

- Valeurs déclarées
- A partir d'essais de caractérisation
- Reproduit tous les 2 ans à minima
- En continu pour le Smart UP

Convenance

- Convenir des propriétés du BFUP,
- Fabriqué par l'outil industriel
- Sur des échantillons moulés

Elément Témoin

- Vérifier globalement et localement l'affaiblissement du renforcement des fibres sur ouvrage par rapport au valeur mesurées sur prismes moulés en convenance.



Le coefficient K n'est pas un coefficient d'orientation des fibres

Points de vigilance en PRO / DCE

Les « bétons types » et les valeurs des guides et normes peuvent être optimistes dans certaines configurations (combinaisons de propriétés peu compatibles) :

- S'assurer que les valeurs requises sont atteignables pour l'utilisation et la mise en œuvre prévue,
- S'assurer qu'il n'y a pas d'incompatibilité entre les caractéristiques exigées,
- Exemples :
 - Taux de fibres compatible avec la fluidité requise pour la mise en œuvre,
 - Taux d'adjuvantation compatible avec le retrait maximum admissible,
 - Résistance élastique avant fissuration compatible avec le caractère écrouissant demandé (un taux de fibre important semble faire augmenter plus vite la résistance pré-fissuration que post-fissuration ce qui diminue le caractère écrouissant).

Points de vigilance en PRO / DCE

Facilement atteignable	Vigilance	Difficilement atteignable
Porosité Résistance à l'abrasion Résistance à la compression Résistance aux agressions chimique	Valeur du retrait	La <u>combinaison</u> de : $f_{ctk,el} > 9 \text{ MPa}$ Loi T3 Très fluide

Points de vigilance en PRO / DCE

La carte d'identité du BFUP (déclarative) peut apporter moins de garantie qu'une épreuve d'études d'un béton classique (largement documentée, PV d'essais disponibles) :

- Exiger des études complète au DCE si le projet le nécessite, préciser les convenances
- Rallonge notablement la période de préparation

Béton classique	BFUP
Art 8 du Fasc 65 - Épreuves d'études - Épreuves de convenance	NF P 18-470, art 5 et 7 - Épreuves d'études - Épreuves de convenance
<u>Études</u> - Référence de moins de 2 ans & Résultats sur n prélèvements + étude stat - Étude avec gâchées dérivées	<u>Études</u> - Peuvent être remplacées par carte d'identité
<u>Convenances :</u> - Gâchées dérivées si BAP	<u>Convenances :</u> - Ajoutent un élément témoin, facteurs K - Ne parlent pas de plusieurs gâchées

Points de vigilance en PRO / DCE

- Extrait de la norme 18-470 :

5.2.1 Généralités

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.

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.

Points de vigilance en PRO / DCE

Des paramètres complémentaires de contrôle d'ouvrabilité et de régularité du BFUP :

- La courbe de puissance du malaxeur, le protocole (lié au matériel),
 - L'air occlus,
 - Pour chaque paramètre : valeur cible et écart type,
-
- À rattacher à la carte d'identité ?
 - À spécifier au plus tard lors des conventions,
 - Avoir les outils de contrôle en cas de fabrication chantier,

Points de vigilance en PRO / DCE

- Extrait de la norme 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.

Points de vigilance en PRO / DCE

Points particuliers sur chantier (on ne se pose plus la question en centrale ..) :

- système de contrôle des pesées des big bags et adjuvants,
- wattmètre pour le malaxeur, transmission en temps réel,
- mesure automatique des temps de malaxage,

Points liés à la mise en œuvre :

- Faire les essais d'ouvrabilité et d'étalement :
 - après transport si le projet le nécessite,
 - À plusieurs étapes de la fabrication et du transport pendant les convenances,

Points de vigilance en PRO / DCE

Encore une dernière recommandation ?

L'adjuvantation dépend fortement de :

- la température extérieure et de l'hygrométrie (dessiccation très rapide en face supérieure),
- la température du prémix,
- la méthode de mise en œuvre (fluidité),
- les lots de ciment et de prémix,

➤ Recaler une « gâchée à blanc » à chaque changement de lot ou la veille du premier bétonnage

Points de vigilance en PRO / DCE

Synthèse d'une vision, qui n'est pas nécessairement la seule possible (à adapter au chantier) :

- **Épreuves d'études** ou **carte d'identité** avec nombreuses références étayées

En laboratoire, indépendante du protocole (?), robustesse de la formule aux gâchées dérivées

- **Épreuves de convenance** très en amont, avec gâchées dérivées si nécessaire pour le projet

Figeant le protocole et les matériels,

Confirmant la résistance à long terme sur la gâchée nominale et les dérivées (?),

Retour expérience éléments témoins et facteurs K,

Robustesse de l'ouvrabilité sur les dérivées et mise en œuvre (orientation des fibres),

- **Gâchées à blanc** au démarrage effectif

Dernier recalage, adaptation aux lots livrés, n'est pas nécessairement un Point d'Arrêt