

# 1 : Présentation générale des BFUP Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances

P. Marchand  
Ecole des Ponts ParisTech

# Principes de formulation

- Rapport E/C abaissé ( $< 0,2$  contre  $0,4$  à  $0,6$  pour des bétons ordinaires) grâce à l'utilisation de super-plastifiants
- Utilisation de particules ultra-fines (fumées de silice généralement) pour étendre le spectre granulométrique et augmenter ainsi la compacité
- Granulats de taille assez faible (quelques millimètres) et très résistants

# Formulation type

- $E/C < 0,2$
- Quantité de ciment (ou équivalent) comprise généralement entre 700 et 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Super plastifiant représentant 0,5 à 2 % de C
- Teneur en fumée de silice élevée (20 à 30 % de C)
- Granulats très résistants et de taille réduite (D de 1 à 7 mm)

# Comparaison BO/BFUP



Béton ordinaire



BFUP

# Comportement en compression

- Avec ce type de composition → matrice très compacte, avec une très bonne résistance en compression, >130 ou 150 MPa
- Comportement explosif après avoir atteint le pic de résistance en compression
- → nécessité d'ajouter des fibres pour apporter de la ductilité !

# Fibres

- Pour les applications structurelles : fibres métalliques,
  - représentant 2 à 3,75 % en volume, soit 160 à 300 kg/m<sup>3</sup>,
  - très haute résistance, 2000 MPa,
  - Longueur de 12 à 20 mm
  - Diamètre de 0,1 à 0,3 mm
  - Rapport diamètre longueur calculé pour obtenir un glissement avec la matrice et non une rupture !



# Fibres

- Pour les applications non structurelles : fibres organiques (PVA, polyvinyl alcool),



Fibres PVA (source : fra.sika.com)

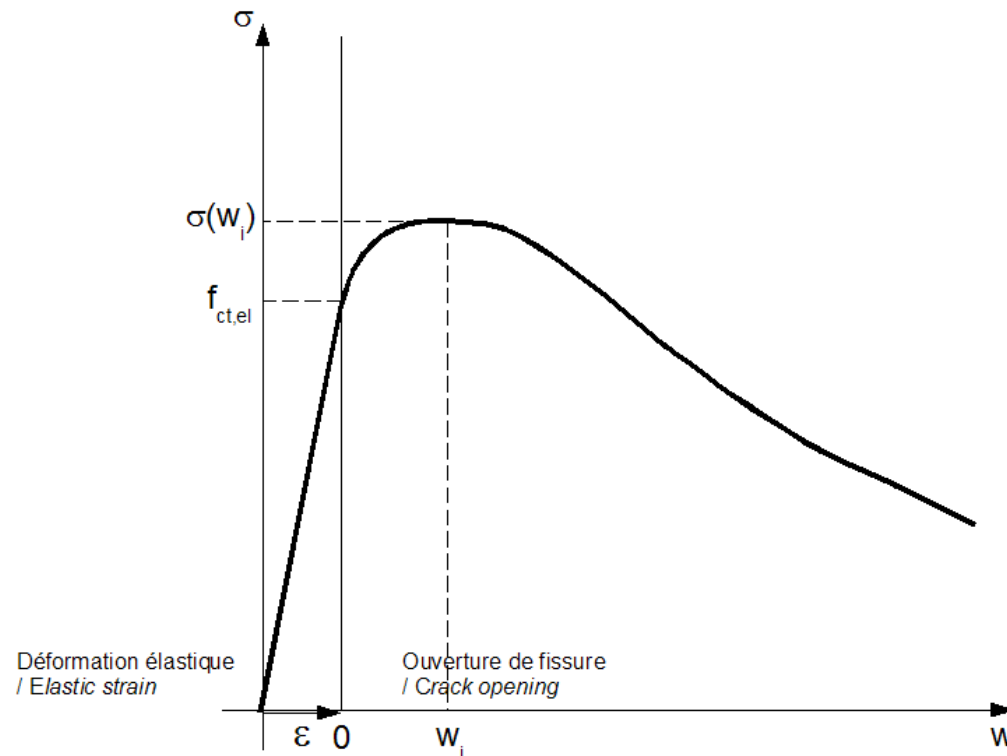
- Si sollicitation type feu, insertion de fibres polypropylènes // BHP



Fibres polypropylène (source : fra.sika.com)

# Comportement en traction

- Résistance de la matrice cimentaire, jusqu'à environ 9-10 MPa
- Résistance post-fissuration du même ordre (en fonction du taux de fibres)



# Historique

- Premières recherches dans les années 1970 par le professeur Bache (Danemark) → CRC (produit toujours utilisé aujourd'hui)
- En France, recherches dans les années 1990 par Pierre Richard (groupe Bouygues), mise au point du BPR (béton de poudres réactives)
- Optimisation de la formulation du BPR avec Lafarge pour obtenir le Ductal®, commercialisé à la fin des années 1990.

# Historique

- Sous l'impulsion d'EDF, Eiffage associé à Sika crée le BSI® (Béton Spécial Industriel). Réparation d'aéroréfrigérants (Civaux et Cattenom) avec du BSI® et du Ductal®.
- Dans les années 2000, Vicat associé à Vinci crée le BCV®
- Au LCPC, création du CEMTEC multiscale® qui porte le concept de BFUP à des niveaux encore jamais atteints

# Historique

- Publications de recommandations AFGC-Sétra en 2002
- Recherches sur les BFUP en Allemagne à partir de 2004, développement sur le plan international (Japon, Corée, Australie, USA, ...)
- Mise à jour des recommandations AFGC-Sétra en 2013
- Publication de normes françaises en 2016

# Traitement thermique

- Certains BFUP bénéficient d'un traitement thermique :
  - Cure thermique modérée (40-50°C pour accélérer la prise)
  - Traitement thermique après prise : 90°C en atmosphère saturée pendant 48h. (cas du Ductal® FM)
- Le deuxième type de traitement thermique permet de ne plus avoir de retrait et quasiment plus de fluage à l'issue, mais trop coûteux économique et environnementalement. Quasi abandonné aujourd'hui !
- Le premier type a moins d'influence sur les effets différés mais permet d'accélérer la prise → encore pertinent pour la préfabrication

# Traitement thermique



Exemple de traitement thermique de type 2 appliquée sur des poutres en Ductal  
Source : mémoire de thèse Florent Baby

# Retrait très important :

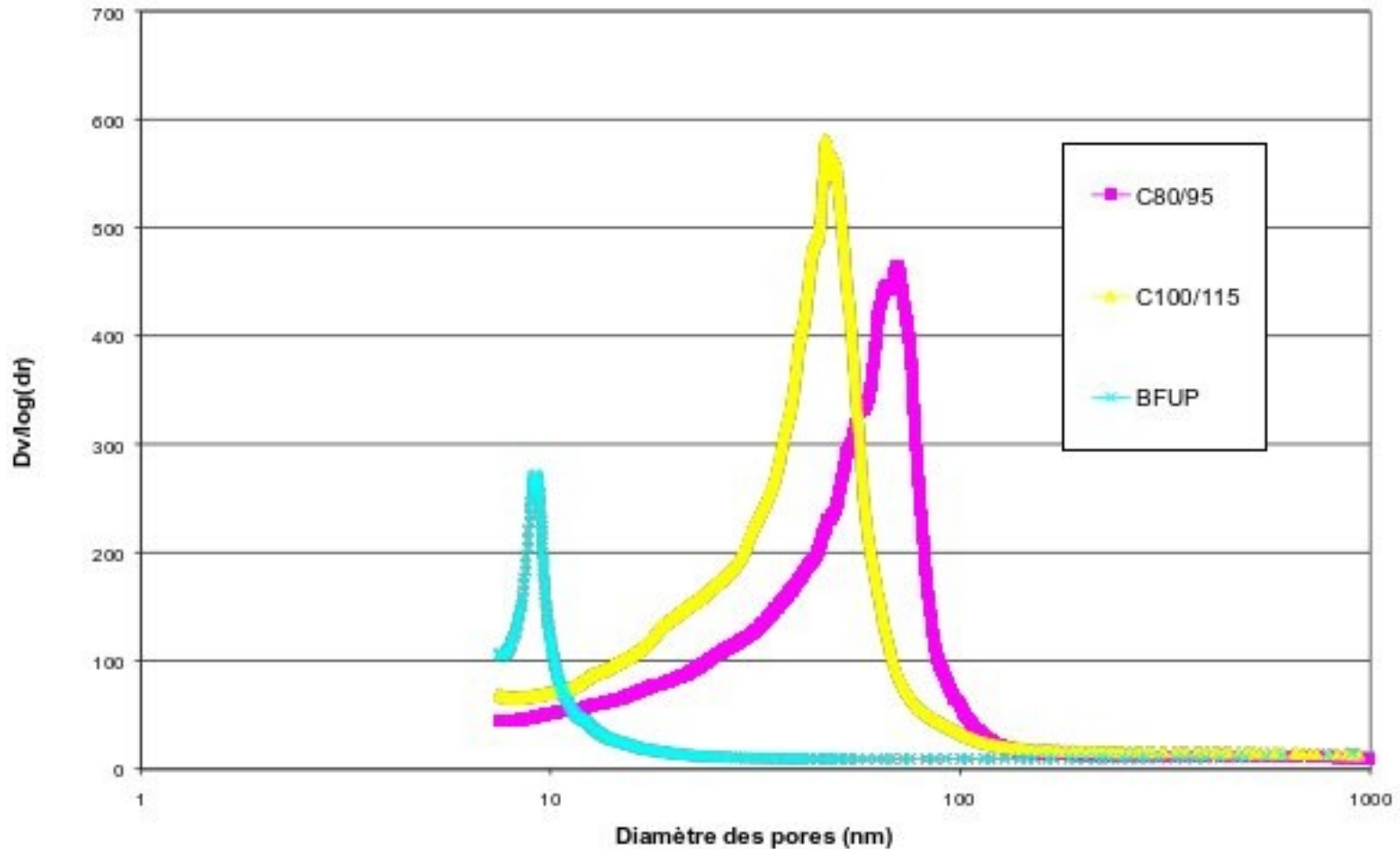
- Retrait endogène de l'ordre de  $5,50 \cdot 10^{-4}$
- Retrait de dessiccation de l'ordre  $1,50 \cdot 10^{-4}$   
(pas de retrait de dessiccation après traitement thermique de type 2)

# Fluage réduit, comme les BHP :

- Coefficient de fluage d'environ 0,8 à 1 sans traitement thermique de type 2
- Coefficient de fluage de 0,2 à 0,5 après traitement thermique de type 2

# Durabilité des BFUP

- Très faible porosité



Distribution de la taille des pores pour différents bétons, source CERIB

# Durabilité des BFUP

- Porosité accessible à l'eau

	BO	BHP	BTHP	BFUP
porosité à l'eau (%)	14 - 20	10 - 13	6 - 9	1,5 - 5

- Perméabilité à l'oxygène

	BO	BHP	BTHP	BFUP
<i>Perméabilité à l'oxygène (m<sup>2</sup>)</i>	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-18</sup>	<10 <sup>-19</sup>

# Durabilité des BFUP

- Diffusion des ions chlores

	BO	BHP	BTHP	BFUP
Coefficient de diffusion des ions chlore (m <sup>2</sup> /s)	> 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup> à 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-13</sup> à 10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-13</sup>

- => enrobage aciers passifs réduit par rapport à un béton ordinaire (divisé par  $\sqrt{5}$ )

# Durabilité des BFUP

- Protection des fibres contre la corrosion

	C30/37	C80/95	BFUP
Vitesse de corrosion des armatures ( $\mu\text{m}/\text{an}$ )	1,2	0,25	<0,01
Résistivité ( $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ )	16	96	1133

Exemples de résistivités électriques mesurées pour différents types de béton,  
Source : N. ROUX et al. « Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes » Journal of Materials in Civil Engineering, Feb 1996 / 1.

- Trace de rouille des fibres en parement, mais protection des fibres à coeur

# Durabilité des BFUP

- Résistance au gel/dégel

	C45	C105	BFUP 1	BFUP 2	BFUP 3	BFUP 4
Perte de masse (kg/m <sup>2</sup> )	3,12 – 3,32	0,12	0,004	0,006	0,003	0,007

Tests de résistance au gel/dégel,  
Source : C.R. BRAAM, INNOCONCRETE report,  
Eureka project, freeze-thaw resistance, 2006

# Durabilité des BFUP

- Résistance à l'abrasion
  - Essai consiste en un jet de sable sur le matériau puis comparaison au résultat sur du verre

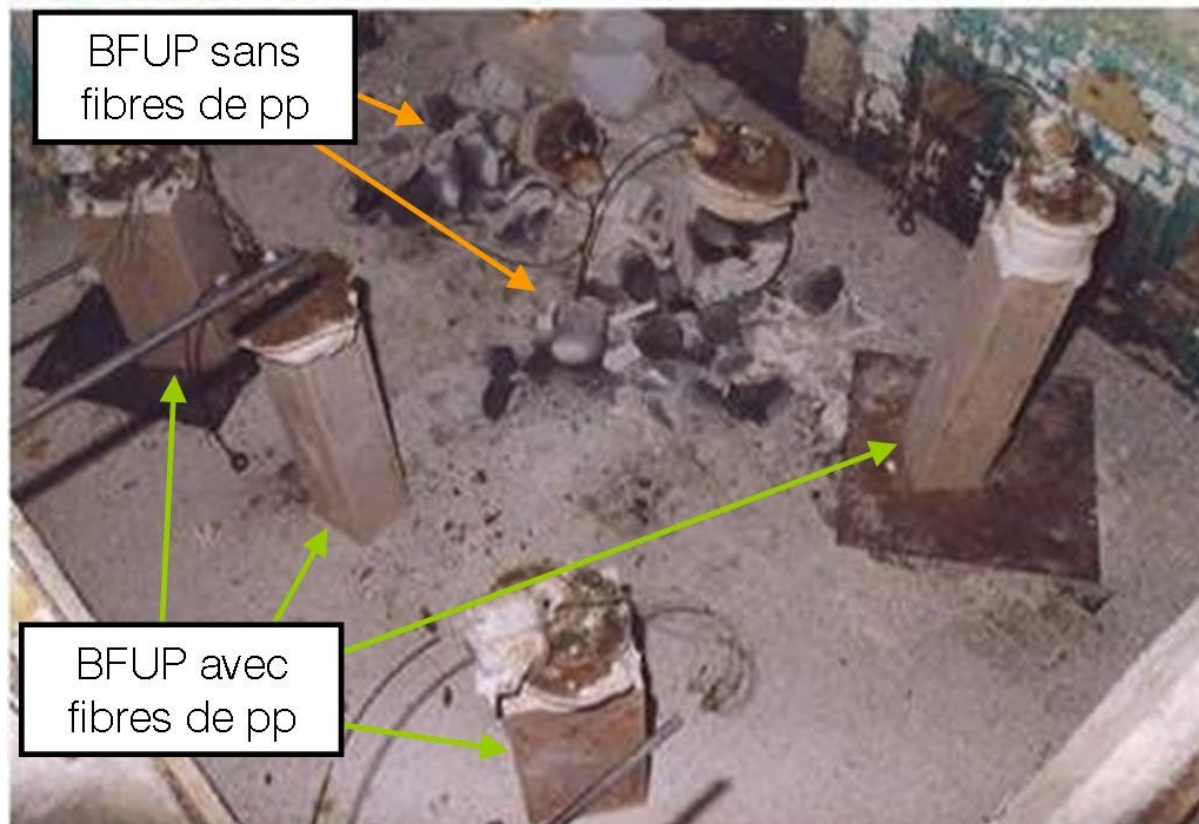
	<i>BO</i>	<i>BHP</i>	<i>BFUP</i>
Coefficient	4	2,8	0,8 à 1,3
CNR			0,8 to 1,3

Essai d'abrasion

Source : [Rapport d'essais de la Compagnie Nationale du Rhône, Laboratoire d'essais Mesures Contrôles, rapport n°94-461]

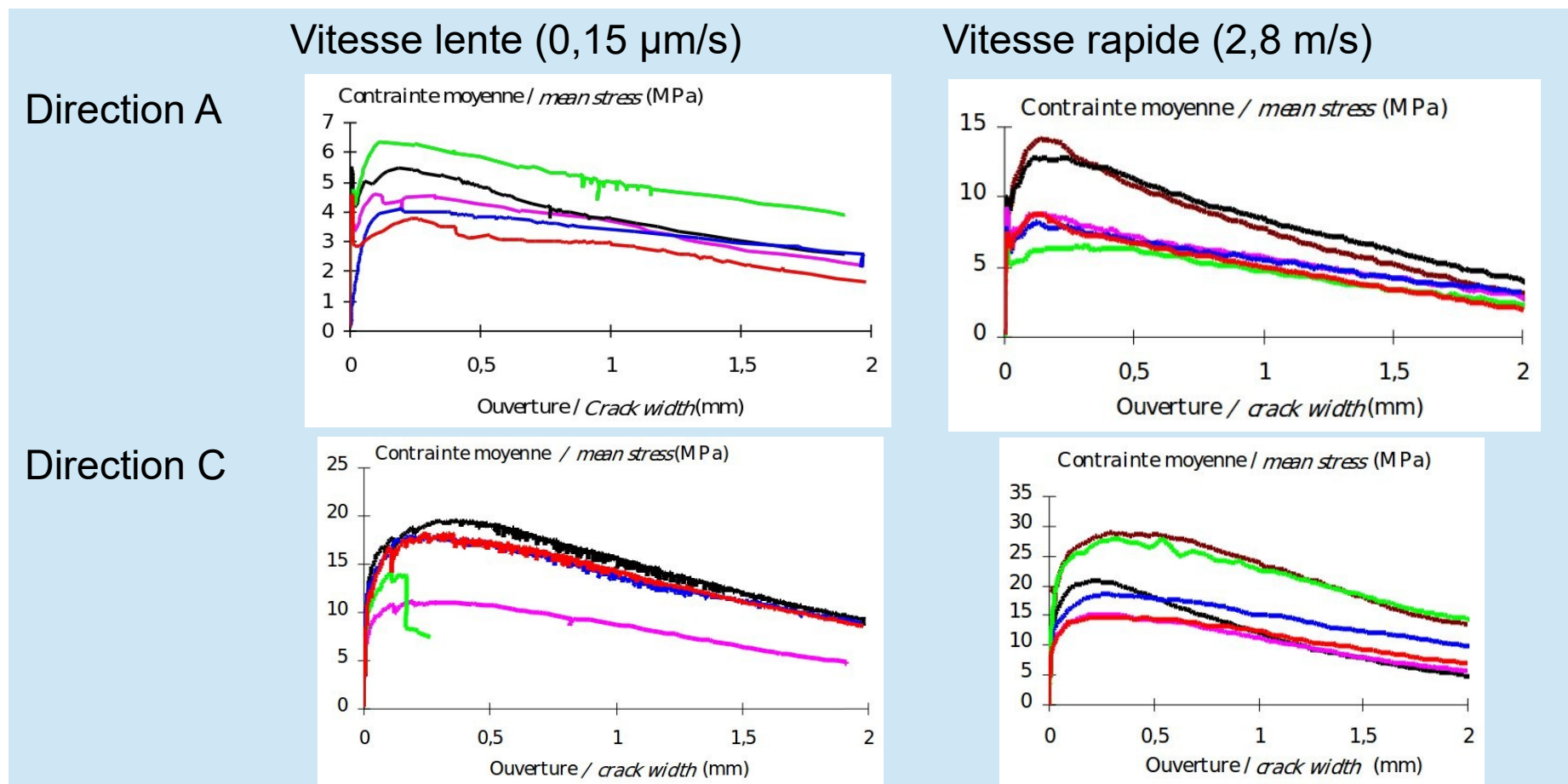
# Comportement au feu

- Nécessité de placer des fibres de polypropylène



Poteaux de Ductal®-AF et de Ductal®-FO après exposition au feu ISO834

# Résistance au choc des BFUP



Essais de traction directe sur BPR en vitesse lente et rapide

Source : TOUTLEMONDE F. et al., Développement d'un conteneur pour l'entreposage de déchets nucléaires : résistance au choc, Revue

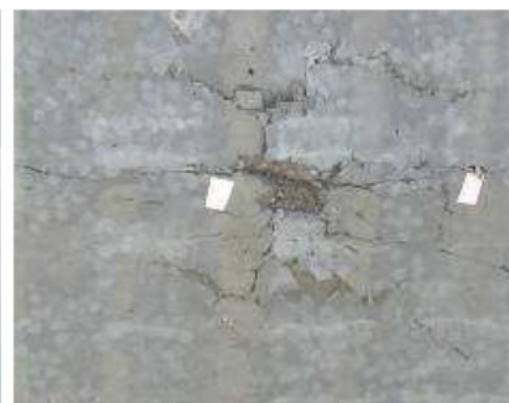
=> utilisation possible pour conteneurs à déchets nucléaires, ou applications militaires

# Résistance au choc des BFUP

Face  
arrière  
Béton  
ordinaire



Face  
arrière  
BFUP



Après 1<sup>ère</sup>  
explosion

Après 2<sup>ème</sup>  
explosion

Source : Investigation of UHPFRC Slabs Under Blast Loads  
REBENTROST et Al, Conférence Marseille 2009