

Béton de poudres réactives

par **Régis ADELINÉ**

*Ancien élève de l'École polytechnique
Ingénieur des Ponts et Chaussées
Chef de service adjoint à la Direction scientifique Bouygues BTP*

1. Définition du BPR	C 2 216 - 2
1.1 Principes.....	— 2
1.2 Formulation type du BPR.....	— 2
2. Propriétés mécaniques du BPR.....	— 2
2.1 Résistance en compression	— 2
2.2 Résistance en traction directe	— 2
2.3 Résistance en traction par flexion.....	— 3
2.4 Retrait. Fluage.....	— 3
2.5 Autres caractéristiques	— 3
3. Durabilité du BPR	— 4
3.1 Porosité	— 4
3.2 Perméabilité. Résistance au gel-dégel. Abrasion	— 4
3.3 Résistance à la corrosion	— 4
3.4 Résistance aux agents agressifs	— 4
3.5 Résistance au feu.....	— 5
4. Conception et calcul des structures	— 5
4.1 Concevoir sans armatures passives	— 5
4.2 Principales adaptations des règles BPEL.....	— 5
4.3 Justification par l'expérimentation	— 5
5. Fabrication et mise en œuvre.....	— 5
5.1 Réception et stockage des composants	— 5
5.2 Études préalables	— 6
5.3 Dosage et mélange des composants.....	— 6
5.4 Mise en œuvre.....	— 6
5.5 Contrôle du béton à la centrale	— 6
6. Applications	— 6
Pour en savoir plus	Doc. C 2 216

Le béton de poudres réactives (BPR) est un matériau à matrice cimentaire pour lequel le nombre, la nature, la morphologie et le dosage des différents composants granulaires ont été optimisés afin d'obtenir des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée.

La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré- ou post-tension.

1. Définition du BPR

1.1 Principes

La formulation du BPR est guidée par les principes suivants :

- les effets mécaniques induits par l'hétérogénéité des composants granulaires des bétons usuels sont fortement réduits par la suppression des gros granulats et par l'amélioration importante des propriétés mécaniques de la pâte liante ;

- l'introduction de composants de différentes classes granulaires respectant le principe de desserrement, suivant lequel les granulats fins occupent un volume supérieur à l'indice des vides des granulats de classe supérieure, permet de minimiser l'indice des vides global du matériau et la quantité d'eau nécessaire au gâchage ;

- l'emploi de fibres métalliques de petites dimensions et de haute limite élastique permet d'utiliser pleinement les qualités de la matrice du BPR en terme de contrainte d'adhérence ;

- les techniques de fabrication et de mise en place sont celles utilisées pour les bétons traditionnels avec pour seule contrainte particulière un allongement important du temps de malaxage.

Enfin, il est possible de supprimer tout retrait en appliquant après prise un traitement thermique à 90 °C, qui permet par ailleurs une amélioration supplémentaire des propriétés mécaniques.

1.2 Formulation type du BPR

Une formulation type de BPR est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 – Formulation type du BPR (au m³)

Ciment	Sable	Quartz broyé	Fumées de silice	Fibres métalliques	Adjuvant (extrait sec)	Eau totale
710 kg	1 020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg	140 L

Cette formulation peut être déclinée, en faisant varier :

- le type des constituants ;
- la proportion relative des constituants ;
- le taux de fibres (0 % pour le matériau non fibré, 2 à 2,5 % en volume pour le matériau fibré) ;
- le rapport E/C (eau/ciment).

2. Propriétés mécaniques du BPR

Les propriétés mécaniques d'un BPR sans traitement thermique sont différentes de celles d'un BPR ayant subi un traitement thermique. Sans (ou avant) traitement thermique, les propriétés évoluent au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation du ciment, comme pour les bétons classiques. On les caractérise alors par leur valeur à 28 jours. Après traitement thermique, les propriétés du matériau sont stables dans le temps et peuvent être caractérisées par une valeur unique.

2.1 Résistance en compression

La résistance en compression du BPR est mesurée sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 70 mm et de hauteur 140 mm, dont les deux faces ont été préalablement rectifiées. Cette opération de rectification est primordiale pour obtenir un parallélisme parfait des faces, éviter toute flexion parasite et diminuer l'écart type des essais.

Sans traitement, la résistance moyenne en compression atteint 180 MPa à 28 jours. Après traitement, elle atteint plus de 200 MPa dès l'âge de 4 jours (tableau 2).

Tableau 2 – Principales caractéristiques du BPR (valeurs moyennes)

Caractéristiques	À 28 jours	Après traitement thermique
Résistance à la compression(MPa)	180	220
Résistance à la traction directe(MPa)	9	10
Résistance à la traction directe : post-fissuration(MPa)	5	6
Résistance à la flexion trois points(MPa)	36	40
Module d'Young.....(GPa)	60	55
Coefficient de dilatation(en 10 ⁻⁶ /°C)	12	12
Masse volumique.....(kg/m ³)	2 500	2 500

L'utilisation du concept de confinement dans un tube métallique mince permet d'augmenter encore la résistance en compression ; en appliquant en plus une pression sur le BPR pendant sa prise (le tube jouant alors le rôle de la chemise du piston) on compense les effets de retrait et on applique une légère étreinte latérale passive sur le béton : sa résistance à la compression peut alors atteindre 350 MPa.

2.2 Résistance en traction directe

La résistance en traction est directement liée au dosage en fibres et plus précisément au dosage et à l'orientation locaux des fibres dans la zone sollicitée en traction. Ces paramètres sont représentés par un coefficient d'orientation moyen α , qui varie de 0 (aucune fibre dans la direction de sollicitation) à 1 (toutes les fibres sont dans la direction de sollicitation).

La figure 1 illustre les trois types de comportement que l'on obtient en fonction de ce dosage local : le type I correspond à des fibres en faible nombre ($\alpha < 0,2$), le type II à des fibres moyennement orientées ($0,2 < \alpha < 0,4$) et le type III à des fibres bien orientées ($\alpha > 0,5$).

Les essais de traction directe sont réalisés selon les recommandations de l'AFREM (Association française de recherches et d'essais sur les matériaux et les constructions) sur des éprouvettes de diamètre 70 mm, entaillées sur une profondeur de 15 mm environ.

On distingue deux valeurs principales : la résistance maximale et la résistance post-fissuration correspondant à une ouverture de fissure donnée. Des valeurs types sont données dans le tableau 2.

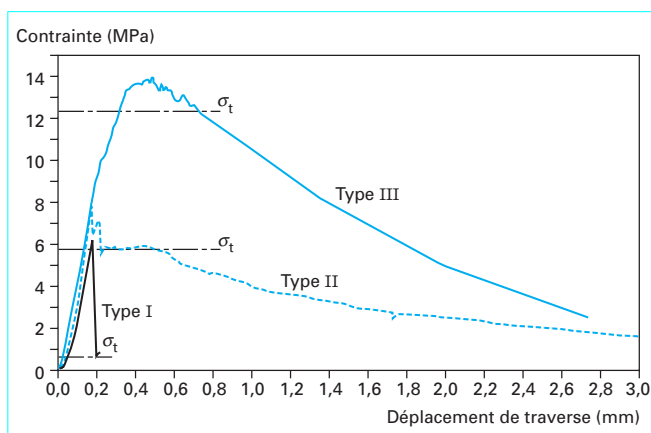


Figure 1 – Principaux types de comportement du BPR en traction directe

Un comptage des fibres dans la section de rupture permet a posteriori de confirmer la relation entre le nombre de fibres et la résistance post-fissuration.

2.3 Résistance en traction par flexion

La résistance en traction par flexion est mesurée par un essai de flexion trois points sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ mm (norme NF EN 196-1). Le mode de fabrication de ces éprouvettes permet d'obtenir une orientation des fibres quasi invariable, ce qui rend cet essai adapté au suivi de la production.

La contrainte résultant de cet essai est une contrainte fictive qui correspondrait à un matériau parfaitement élastique linéaire. La figure 2 illustre la relation qui existe entre la contrainte de flexion et la contrainte réelle de traction.

2.4 Retrait. Fluage

Les courbes de retrait et de fluage du BPR sont données figures 3 et 4. La valeur élevée du retrait endogène (375×10^{-6} déformations) est due à la faible quantité d'eau, amplification du phénomène observé sur les BHP (bétons à haute performance). Le retrait total s'élève à environ 500×10^{-6} déformations.

Le traitement thermique a un effet particulier sur le retrait et le fluage : après traitement thermique, le BPR n'effectue plus aucun retrait et les déformations de fluage se stabilisent très rapidement (quelques jours) à une valeur très faible ($k_{fi} < 0,2$).

Cette particularité peut être mise à profit pour le dimensionnement de certaines structures.

2.5 Autres caractéristiques

L'énergie de fracturation du BPR, déterminée à partir d'essais de flexion trois points sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ mm entaillées, s'élève à $13\,000 \text{ J/m}^2$. Cette valeur correspond à un matériau ductile.

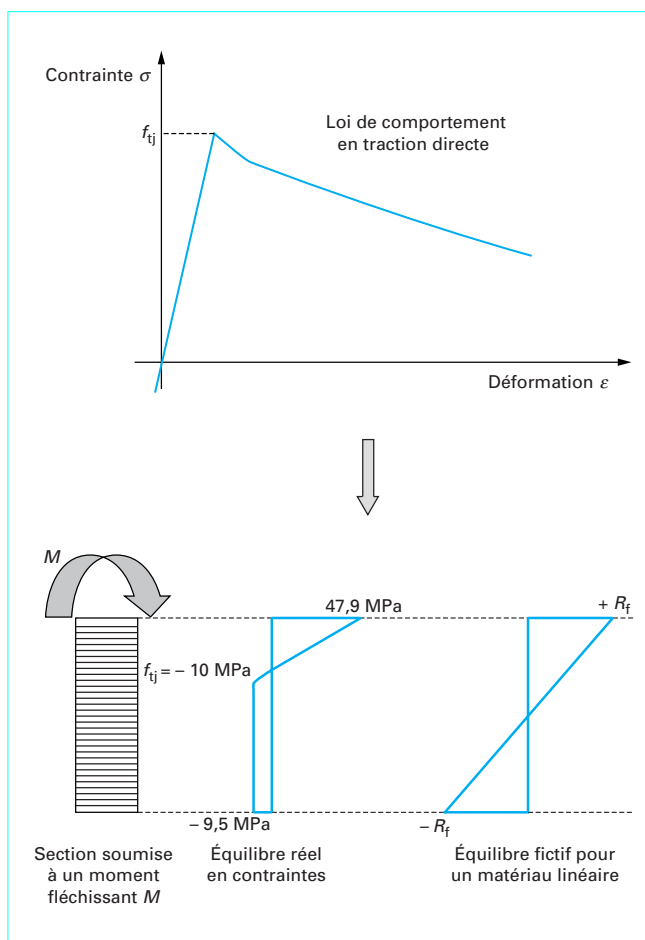


Figure 2 – Relation entre la contrainte de flexion et la contrainte en traction directe

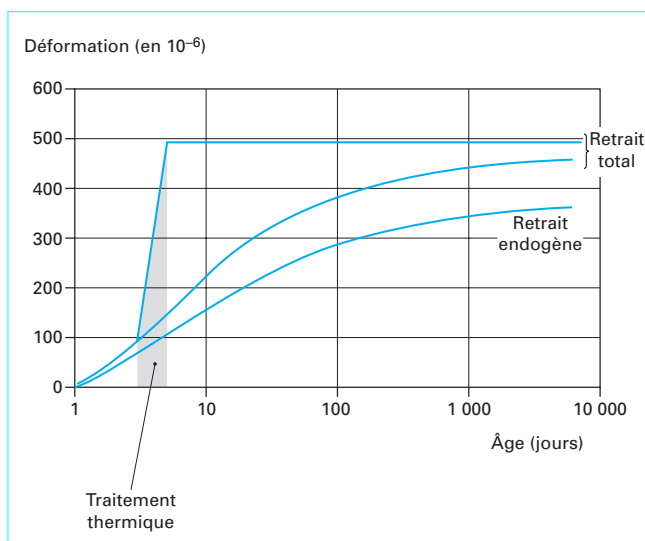


Figure 3 – Courbes de retrait du BPR

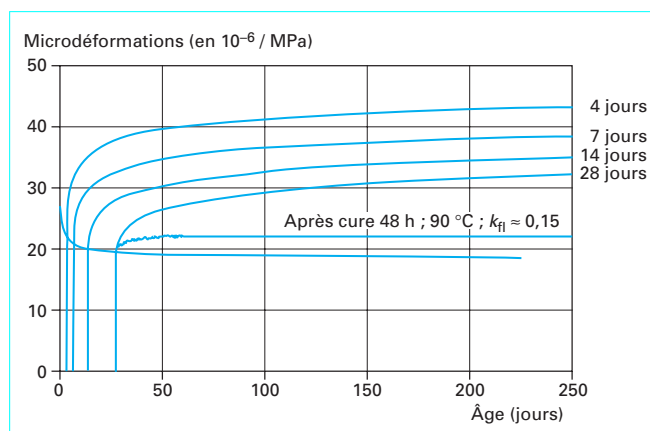


Figure 4 – Courbes de fluage du BPR

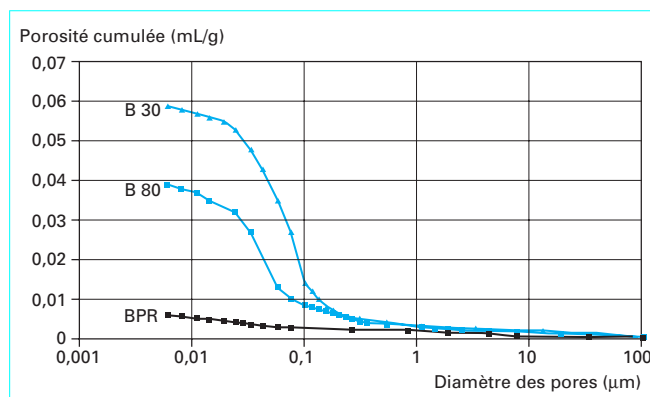


Figure 5 – Porosité comparée du BPR

3. Durabilité du BPR

Les premiers essais de durabilité réalisés sur le BPR remontent à 1991 et ont permis d'acquérir un nombre important de données. L'origine des propriétés de durabilité du BPR est à chercher dans la qualité de la microstructure : l'application des deux premiers principes énoncés au paragraphe 1.1 ont pour effet de diminuer la porosité et d'augmenter l'homogénéité du matériau.

3.1 Porosité

La porosité est un paramètre essentiel pour la durabilité des matériaux à base cimentaire car la taille des pores et leur connectivité déterminent la résistance du matériau à la pénétration d'agents agressifs.

La porosité entre 6 nm et 100 µm (cf. figure 5) a été mesurée à l'aide d'un porosimètre à mercure. On observe pour le BPR une absence totale de porosité capillaire, celle qui est à l'origine des principaux mécanismes de diffusion dans les matériaux à matrice cimentaire.

La porosité accessible à l'eau du BPR, mesurée selon le mode opératoire AFREM, vaut 2 %.

3.2 Perméabilité. Résistance au gel-dégel. Abrasion

La très faible porosité et l'absence d'eau libre dans les pores capillaires ont pour conséquence directe les caractéristiques de perméabilité à l'air, de résistance au gel-dégel et de résistance à l'abrasion indiquées dans le tableau 3.

Le BPR est plus résistant au gel-dégel qu'un BHP à air entraîné spécialement formulé à cet effet, et trois fois plus résistant à l'abrasion qu'un béton classique (suivant l'essai CNR).

Tableau 3 – Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200

Porosité	< 2 %
Perméabilité à l'azote	1 à 5 10^{-20} m ²
Gel-dégel :	
– module résiduel après 300 cycles	100 %
– perte de masse après 300 cycles	< 10 g/cm ²
Abrasion (coefficient CNR)	1,3
Carbonatation :	
– constante de carbonatation K_c	< 0,1 mm/an ^{0,5}
– pénétration sur 15 mm	> 12 000 ans
Corrosion :	
– coefficient de diffusion apparent	Non mesurable
– coefficient de diffusion effectif	0,02

3.3 Résistance à la corrosion

Trois processus peuvent potentiellement être à l'origine de la corrosion dans le BPR :

- la pénétration d'ions chlorures ;
- la carbonatation ;
- la propagation de la corrosion des fibres métalliques à partir de la surface.

Des essais de diffusion et de migration accélérée des ions chlorures ont montré une parfaite imperméabilité du BPR à ces agents (cf. tableau 3). La carbonatation est insignifiante. Enfin, le réseau de fibres n'étant pas continu, la corrosion ne peut se propager aux fibres incluses dans la masse.

3.4 Résistance aux agents agressifs

La résistance aux agents agressifs tels que l'eau de mer, l'eau distillée, le sulfate de calcium, l'acide acétique ou le sulfate de sodium a été évaluée à partir d'essais de flexion 3 points sur des échantillons conservés pendant 12 mois en permanence dans ces solutions agressives. Elle se concrétise par une baisse de 5 à 25 % des performances par rapport au matériau sain.

3.5 Résistance au feu

Compte tenu de sa très faible porosité, le BPR ne présente pas une aussi bonne résistance au feu que les bétons traditionnels. Sans traitement particulier, il présente une tenue au feu d'environ 15 min. Une formulation particulière peut être utilisée qui porte cette valeur à 60 min pour une structure non chargée et à 30 min pour une structure chargée. Pour obtenir une tenue au feu supérieure, il convient d'employer des protections anti-feu additionnelles.

4. Conception et calcul des structures

4.1 Concevoir sans armatures passives

La résistance en traction et la ductilité du BPR permettent de l'employer dans les structures sans armatures passives. La dissymétrie de performances en traction et compression est compensée par l'utilisation de précontrainte (par pré- ou post-tension) dont le but est de reprendre les efforts principaux de traction. Les efforts secondaires de traction (cisaillement, efforts localisés, diffusion des charges concentrées...) sont quant à eux repris par les fibres.

Cette conception de structures sans aciers passifs ouvre la voie pour les concepteurs à l'emploi de nouvelles formes, les contraintes liées au façonnage et à l'enrobage des armatures ayant disparu.

4.2 Principales adaptations des règles BPEL

Le principe de justification des structures en BPR a été élaboré à partir du BPEL et de son extension aux bétons à hautes performances, ainsi que des recommandations AFREM pour les structures en bétons de fibres.

La notion de classe de justification (I ou II suivant le type de construction) ainsi que les vérifications des contraintes associées à ces classes sont conservées.

Les adaptations concernent en premier lieu la définition des caractéristiques du matériau qui sont spécifiques au BPR : résistance caractéristique en compression (f_c) (à 28 jours et après traitement thermique) et loi d'évolution dans le temps, résistance caractéristique en traction (f_t), loi de retrait et de fluage. La notion de résistance en traction post-fissuration σ_{fu} propre aux bétons de fibres est introduite pour les vérifications aux ELU (états limites ultimes).

Les valeurs caractéristiques types que le projeteur peut utiliser au stade de l'avant-projet sont indiquées dans le tableau 4. En fonction du projet, ces valeurs, indicatives, peuvent être modifiées à la baisse comme à la hausse.

Un deuxième volet d'adaptations concerne les chapitres de justification des pièces.

L'absence d'armatures passives (armatures de peau, ferrailage minimal...) est justifiée par la capacité du béton fibré à reprendre les mêmes efforts de traction que ces armatures auraient eu pour objet de reprendre. Pour les ELS (états limites de service), le taux de travail du béton fibré est pris égal à $0,8 f_{t28}$ ou $0,8 f_{tTT}$; celui de l'acier est pris égal à f_e ou $2/3 f_e$ suivant les cas.

Tableau 4 – Caractéristiques types du BPR
(en MPa)

Résistance à la compression à 28 jours (f_{c28})	160
Résistance à la compression après traitement thermique (f_{cTT})	190
Résistance à la traction directe à 28 jours (f_{t28})	7
Résistance à la traction directe après traitement thermique (f_{tTT})	8
Résistance à la traction : post-fissuration (σ_{fu})	5
Module d'Young E_{28}	55 000

Les vérifications à l'effort tranchant font intervenir des formules spécifiques qui intègrent d'une part un coefficient de sécurité supplémentaire par rapport aux règles appliquées aux BHP, et qui vérifient la capacité du béton fibré fissuré (via σ_{fu}) à reprendre les efforts de traction induits par l'effort tranchant.

Enfin, les valeurs d'enrobage et d'espacement des armatures de précontrainte sont plus faibles que pour des bétons classiques, compte-tenu de l'absence de granulat dans le BPR, de sa très faible porosité et de sa résistance à la corrosion.

Dans le cas d'armatures de pré-tension, un enrobage de 20 mm est applicable.

4.3 Justification par l'expérimentation

Dans les types de structures qui ne rentrent pas dans le cadre des justifications précédentes, on a recours à une justification par l'expérimentation. Celle-ci peut s'intégrer dans une ATEX (appréciation technique expérimentale) ou être cautionnée par un organisme extérieur habilité (LCPC, CSTB...).

5. Fabrication et mise en œuvre

La fabrication et la mise en œuvre du BPR ne nécessitent pas de matériels spéciaux, mais doivent respecter un certain nombre de règles particulières.

5.1 Réception et stockage des composants

Dans le cas où le BPR est fabriqué à partir d'un premix, il suffit de stocker les sacs ou big bags à l'abri des intempéries.

Si l'on utilise séparément chacun des composants, ceux-ci ne doivent pas subir de variations importantes de composition et il convient de vérifier leurs caractéristiques par lot, au départ des usines productrices et à l'arrivée sur le site de fabrication du BPR. Les poudres doivent être livrées sèches et stockées dans des enveloppes fermées (sacs étanches pour petites quantités, silos pour grandes quantités). Les fibres doivent également être livrées et conservées aussi sèches que possible, et stockées à l'abri des intempéries.

5.2 Études préalables

Chaque formule de BPR, comme pour un béton classique, doit faire l'objet d'une épreuve d'étude et d'une épreuve de convenance. L'utilisation d'un premix permet de réduire leur volume.

■ **Épreuve d'étude** : c'est l'étude de laboratoire qui détermine une formulation de base, en fonction du cahier des charges prévu pour le chantier et des matériaux disponibles.

■ **Épreuve de convenance** : c'est la phase la plus importante des études. Elle consiste à choisir, à partir de la formulation de base déterminée à l'épreuve d'étude, la formule définitive avec les moyens réellement utilisés pour le chantier, c'est-à-dire les dosages et leurs tolérances ainsi que les cycles de fabrications.

En outre, l'épreuve de convenance permet d'ajuster le mode et les moyens de mise en œuvre du BPR, pour parvenir au résultat souhaité, pour chaque pièce coulée.

5.3 Dosage et mélange des composants

■ Matériel

Les dosages et mélanges doivent être effectués dans une centrale à béton du meilleur niveau prescrit par la réglementation officielle, avec quelques dispositions supplémentaires :

- tous les dosages doivent être pondéraux, y compris les liquides (eau et adjuvants) ;
- la précision doit être au moins égale à celle prescrite par la réglementation officielle, et les tolérances définies selon la destination de la formule et les résultats des épreuves d'étude et de convenance décrites précédemment ;
- l'opérateur de la centrale doit pouvoir contrôler sur des cadrans ou écrans le bon déroulement du processus de fabrication, et toutes les opérations doivent être enregistrées pour assurer la traçabilité de la fabrication ;
- le malaxeur utilisé est un malaxeur classique du commerce, de forte puissance, à haute turbulence et haut cisaillement, avec des réglages adaptés aux poudres ; en particulier, les jeux doivent être réduits entre les pièces mobiles et fixes.

Le chargement du malaxeur doit être toujours identique, pour un cycle donné et d'une gâchée à l'autre d'une même formule.

■ Malaxage

La durée du malaxage est définie pour chaque formule, à partir des épreuves d'étude et de convenance. Pour la formulation type citée au paragraphe 1.2, le cycle type pour 1 m³ est :

- mélange à sec de toutes les poudres : 2 min ;
- malaxage après ajout de l'eau avec une partie d'adjuvant : 2 min ;
- malaxage après ajout du reste de l'adjuvant, jusqu'à fluidification maximale : 3 min ;
- ajout des fibres et fin de mélange simultané : 3 min.

Soit un total indicatif de 10 min pour un cycle hors pesée et vidange.

5.4 Mise en œuvre

La consistance du BPR est adaptée à tous les modes de mise en œuvre connus, par exemple :

- coulage simple ;
- coulage au tube plongeur ;
- coulage par injection de pièces massives ;
- centrifugation.

Il n'y a pas de règle particulière pour ces différents modes de mise en œuvre, si ce n'est de respecter les points suivants :

- le processus ne doit pas créer de lacune dans le renfort fibreux (par exemple par croisement de flux de coulages qui orientent les fibres ou par arrêt de bétonnage prolongé, sans remélange parfait de la surface de reprise) ;
- les matériels de mise en œuvre et les coffrages doivent être parfaitement secs. Tout ajout d'eau est interdit pendant toutes les phases de la fabrication et de la mise en œuvre ;
- la cure après coulage est encore plus nécessaire que pour les bétons classiques et à hautes performances. Il faut protéger toutes les surfaces non coffrées et les maintenir saturées en humidité pendant la prise.

5.5 Contrôle du béton à la centrale

On mesure systématiquement la rhéologie du produit par une mesure d'étalement à la table à choc (essai ASTM C230) et on

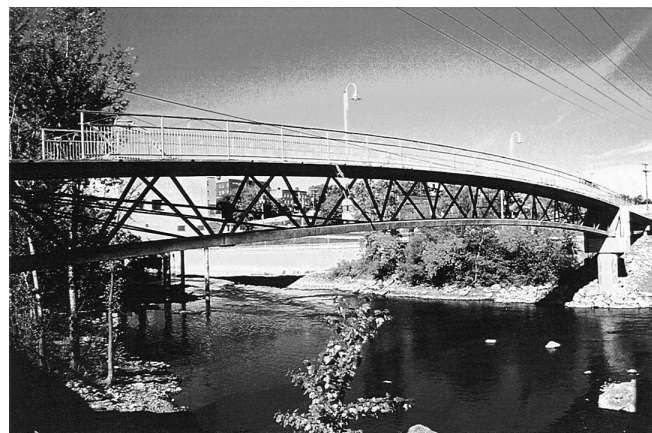


Figure 6 – Passerelle de Sherbrooke

confectionne les éprouvettes destinées au contrôle des propriétés mécaniques.

6. Applications

En exploitant de façon optimale une ou plusieurs propriétés du matériau – résistance mécanique, durabilité, capacité de moulage, stabilité dimensionnelle, gain de poids – il est possible de développer des applications où le BPR se présente comme un concurrent de nombreux matériaux, dont l'acier, l'aluminium et la fonte. Ses applications dépassent alors le simple cadre du bâtiment et du génie civil.

■ Génie civil et bâtiment :

— structures triangulées : la passerelle de Sherbrooke (figure 6) est une structure triangulée de 60 m de portée. Elle illustre un des modes d'emploi du BPR : recherche de la légèreté alliée à une grande rigidité, sans sacrifier à l'esthétique ;

- poutres et poutrelles légères ;
- poteaux confinés ;
- dalles de ponts mixtes ;
- panneaux de façade ;
- voussoirs de tunnels.

■ Industrie :

- bâtis pour machines-outils ;
- dalles d'usure ;
- pièces pour l'emboutissage.

■ Traitement des déchets. Environnement :

- container pour le stockage de déchets radioactifs ;
- dalles filtres pour l'épuration des eaux usées ;
- coulis de blocage de déchets.

■ Protection. Sécurité :

- blindages légers ;
- coffres-forts.

Béton de poudres réactives

par **Régis ADELIN**

Ancien élève de l'École polytechnique

Ingénieur des Ponts et Chaussées

Chef de service adjoint à la Direction scientifique Bouygues BTP

Bibliographie

RICHARD (P.) et CHEYREZY (M.). – *Les Bétons de Poudres Réactives*. Annales de l'ITBTP, mars-avril 1995 n° 532, série Béton 320 pp. 85-102.

CHEYREZY (M.), MARET (V.) et FROUIN (L.). – *Microstructural analysis of Reactive Powder Concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 7, 1995, pp. 1491-1500.

ROUX (N.). – *Durabilité des bétons de poudres réactives*. Conférence en hommage à Michel

Salomon, 26 juin 1997. CATED. Durabilité des Bétons, pp. 46-58.

DUGAT (J.), ROUX (N.) et BERNIER (G.). – *Mechanical properties of Reactive Powder Concrete*. Materials and Structures, vol. 29, n° 188, pp. 233-240, 1996.

ADELIN (R.) et BEHLOUL (M.). – *Ductile pretensioned beams without passive reinforcement*. Symposium BHP 96. Paris juin 1996.

TORRENTI (J.-M.) et MARET (V.). – *High-integrity containers for long-term storage of nuclear wastes*. Symposium BHP 96. Paris juin 1996.

LACHEMI (M.), ADELIN (R.), AÏTCIN (P.-C.) et RICHARD (P.). – *The first Reactive Powder Concrete structure*. Structural Engineering International SEI, vol. 8, n° 2, mai 1998.