

Chap. II Bétons de poudres réactives

II-1 Introduction

Les bétons de poudres réactives (BPR) constituent une nouvelle famille de matériaux de construction dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires. Le BPR est un matériau cimentaire à matrice à ultra haute performance. Le BPR est caractérisé par une forte teneur en bée de silice et par un très faible rapport eau/ciment. C'est un matériau dont les plus gros granulats, en l'occurrence du sable, ont une dimension maximale d'environ 600 μ m. Pour le fabriquer on utilise des matériaux tels que : du ciment Portland, du sable, de la bée de silice, un superplastifiant et de l'eau. On utilise également des fibres d'acier et du quartz broyé pour améliorer certaines caractéristiques de ce béton telles que la résistance et la ductilité. Il se distingue fondamentalement des autres bétons par la très petite taille des panicules granulaires et par le pourcentage élevé des composants ayant une activité hydraulique.

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.

Les BPR sont des micros-bétons armés de micro-armatures, dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. Pour obtenir des performances exceptionnelles, la porosité des BPR est réduite à l'extrême.

II-2 Formule de base des BPR

La formule de base des BPR exprimée en proportions massiques par rapport à la quantité de ciment est la suivante :

Ciment Portland : 1

Sable : 1,1

Fumée de silice : 0,25

Silice de précipitation : 0,01

Superplastifiant (Polyacrylate): 0,01

E/C eau totale) : 0,1 à 0,15

Fibres d'acier : diamètre 0,15mm, longueur de 3 à 12 mm en fonction de l'application (optionnel)

Quartz broyé : environ 0,75 de la masse du sable (optionnel)

II -3. Principes généraux

Les principes qui ont conduit au développement du BPR sont les suivants :

Les principaux axes à prendre en considération dans la fabrication des BRP sont :

- Amélioration de l'homogénéité par la suppression des granulats
- Amélioration de la microstructure par traitement thermique après prise.
- Amélioration de la ductilité par l'emploi de micro fibres métalliques.
- Fabrication et mise en place des procédés proche que possible des pratiques existantes

Les trois premiers principes de base (amélioration de l'homogénéité, amélioration de la compacité, amélioration de la microstructure) conduisent à l'obtention d'une matrice très résistante en compression mais dont la ductilité n'est pas améliorée et L'emploi des fibres métalliques permet d'améliorer la résistance en traction et d'obtenir la ductilité requise.

II.3 Amélioration de l'homogénéité

- A/ hétérogénéité des bétons traditionnels

- B/ Effet lié à la taille des gros granulats
- E/ Effet de l'amélioration des propriétés mécanique
- D/ Effet de la suppression de la zone d'interface.
- E/ Effet liée à la limitation du dosage en sable

A/ hétérogénéité des bétons traditionnels

Le béton traditionnel est un matériau hétérogène dans lequel les granulats (sable et gros granulat ont un module d'élasticité la plupart du temps égal ou supérieur à 70 GPa) constituent un squelette enrobé dans une pâte qui a un module d'élasticité beaucoup plus faible d'environ 18 à 22 GPa. A cette hétérogénéité s'ajoute une hétérogénéité chimique manifestée par un retrait chimique de la pâte pendant le durcissement, retrait empêché par le squelette granulaire chimiquement inerte. L'hétérogénéité qui explique en partie le comportement mécanique médiocre d'un béton traditionnel. Comme ces problèmes d'hétérogénéité sont considérablement réduits dans le cas des BPR ceux-ci ont des propriétés mécaniques nettement améliorées par rapport aux bétons traditionnels

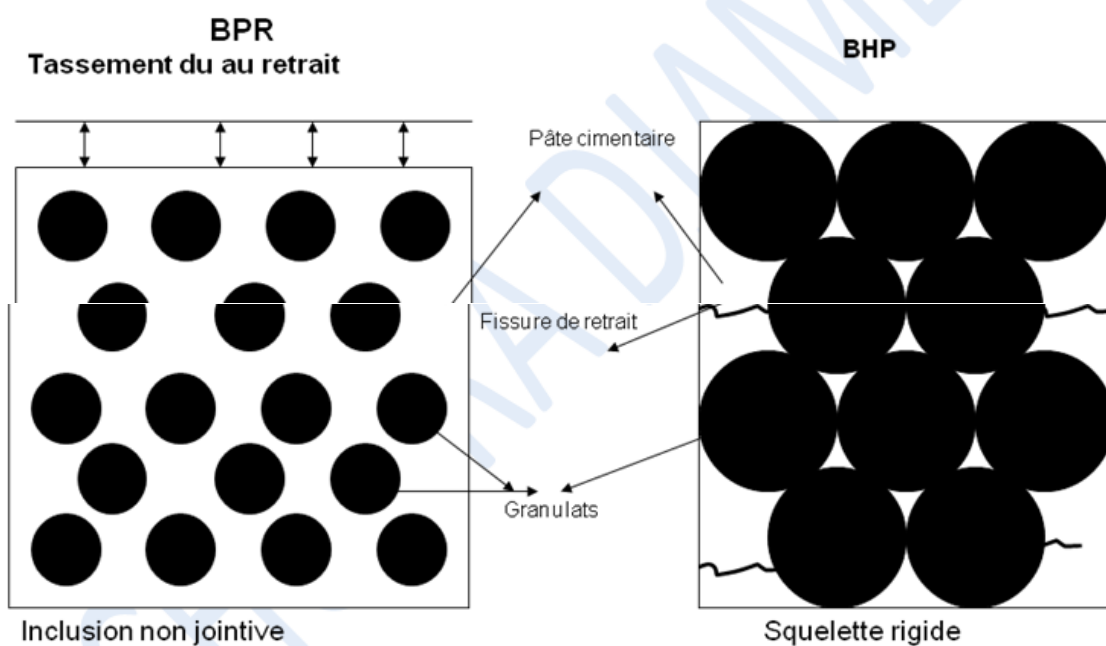


Fig. 1 effet de la rigidité du squelette granulaire

Pour améliorer l'homogénéité du BPR les facteurs suivants ont une grande importance:

B/ La taille des gros granulats

Le BPR, avec une réduction par un facteur d'environ 50 de la taille du plus gros granulat (600 μm au lieu de 20 m), va présenter une réduction considérable de la taille des microfissures d'origine

2- Suppression l'auréole de transition de nombreuses recherches ont montré que l'auréole de transition est supprimé quand la pâte cimentaire a une teneur élevée en fumée de silice. En plus, **dans** le cas de traitement thermique, une liaison chimique s'établit entre la pâte et le sable siliceux

3- Amélioration des propriétés mécaniques de la pâte

4. Limitation du dosage en sable

Dans les BPR le volume de pâte est volontairement supérieur d'au moins 20% à l'indice des vides du sable non compacté, ce qui fait qu'on utilise une quantité de sable par volume de

moins 0,83 fois la masse spécifique apparente du sable non compacté. Ainsi, dans le BPR les grains de sable les plus gros forment un ensemble d'inclusions enrobées dans une matrice continue, donc le retrait d'ensemble n'est plus bloqué par le squelette rigide des gros granulats comme il l'est dans les bétons traditionnels, les grains pouvant donc être entraînés par la pâte et se déplacer les uns par rapport aux autres.(voir figure 1)

II -4 Amélioration de la compacité

- Optimisation du mélange granulaire
- II-4.2 Sélection des composants
- II-4.3 Pressage avant et pendant la prise
 - *réduction de l'air occlus
 - *Compensation du retrait chimique

Optimisation du mélange granulaire

Un facteur important qui mène à une bonne compacité est l'optimisation du mélange granulaire. Cette optimisation dépend des paramètres suivants :

- La granulométrie de chaque classe granulaire
- Caractéristique géométrique (forme) (sphéricité ou angularité)
- Effet de paroi
- Adsorption d'eau des particules

Le paramètre principal d'évaluation d'un mélange granulaire, c'est la quantité d'eau qui doit être ajoutée à la poudre pour obtenir une bonne fluidification; on parlera par la suite de la demande en eau. Elle est déterminée en fonction de la densité relative à partir du rapport E/L

Sélection des composants

- Le sable doit avoir un diamètre moyen de 250µm.
- Le ciment doit avoir une faible teneur en C3A
- superplastifiant peut être à base de polyacrylate ou de polynaphtalène
- La fumée de silice : La fumée de silice est constituée de très petites particules qui peuvent être 30 à 100 fois plus fines que les grains de ciment Portland. Elles peuvent présenter deux effets possède trois fonctions principales: remplissage, amélioration de la rhéologie, production des CSH

II-5. Amélioration de la microstructure par traitement thermique

Le traitement thermique constitue pour les BPR un moyen d'améliorer leurs performances **mécaniques**. Le processus s'effectue après la fin de la prise en atmosphère ambiante humide (vapeur d'eau), ou sèche ((air chaud) à la pression atmosphérique. Les BPR, qui contiennent des fumées de silice, présentent une forte réaction pouzzolanique à une température comprise entre 65°C et **90°C**, qui modifie la structure des hydrates formés.les performances microstructurale des BPR traités thermiquement dépendent :

- . Pourcentage optimal d'hydrates cristallins
 - Formation d'hydrates cristallins à hautes performances mécaniques
 - L'extraction de l'eau non liée chimiquement
 - Traitement par autoclavage

II-6. Amélioration de la ductilité par l'emploi de microfibres et par confinement

- Les matrices de BPR ont une très bonne résistance en compression, mais une faible énergie de fracturation
- . Pour compenser cette fragilité, il faut ajouter des fibres, qui ont comme
 - fonction essentielle de suppléer la perte de résistance en traction de la matrice au droit d'une fissure. La fibre va contrôler l'apparition de la fissure et ne va pas permettre

l'augmentation et la propagation de cette fissure. Donc, les fibres doivent avoir un module d'élasticité élevé.

- Quand on choisit les fibres il faut définir avec beaucoup de soins
 - La nature de la fibre.
 - La longueur et le diamètre.
 - Le dosage pondéral
- les dimensions des fibres utilisées: la longueur de la fibre doit respecter la relation suivante : $L/2 > 10D$
- Le dosage pondéral en fibre est déterminé expérimentalement. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un pourcentage en volume de fibres de 2 % soit environ 150 à 160 kg/m³

II-7 Comportement Mécanique des BPR

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.

Caractéristiques mécaniques	BO	BHP	BPR
Résistance en compression MPa	20-50	60-100	200-800
Résistance en flexion MPa	4-8	6-10	15-140
Energie de fracturation J/m ²	13	140	1000-40000

II-8. Caractéristiques mécaniques des BPR

A/ Essais de compression

Les essais de compression simple pour les BRP sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques ($\varnothing \times H = 70 \times 140, 90 \times 180, 110 \times 220$ mm).

B/ Comportement des BPR en flexion

Le comportement en flexion est généralement étudié sur des éprouvettes prismatiques de dimension $50 \times 40 \times 600$ mm ($b \times h \times l$) en 4 points et la résistance en flexion est mesurée sur des éprouvettes normalisées $40 \times 40 \times 160$ ou $70 \times 70 \times 280$ mm

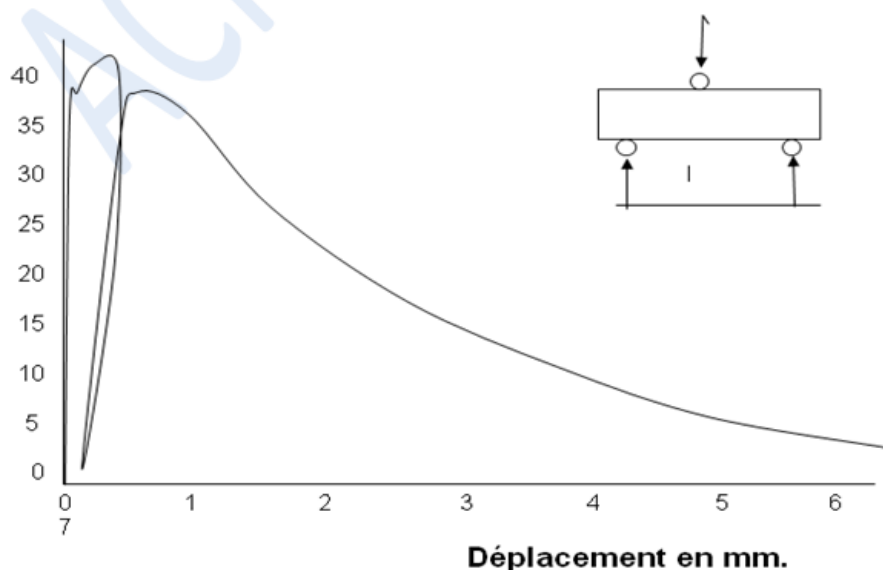


Figure 2 Courbe effort - déplacement en flexion simple d'une éprouvette prismatique en BPR200

C/ Mécanique linéaire de rupture

Le paramètre essentiel qui caractérise la mécanique linéaire de rupture est l'énergie de fracturation G_f .

$$G_f = \int_0^d F(\delta) \frac{d\delta}{A} \quad \text{Ou } F: \text{effort en fonction de la flèche.}$$

d : flèche maximale A : section de l'éprouvette

G_f est calculé à partir de la courbe effort –déplacement (flèche au centre) d'une éprouvette testée en flexion 3-points.

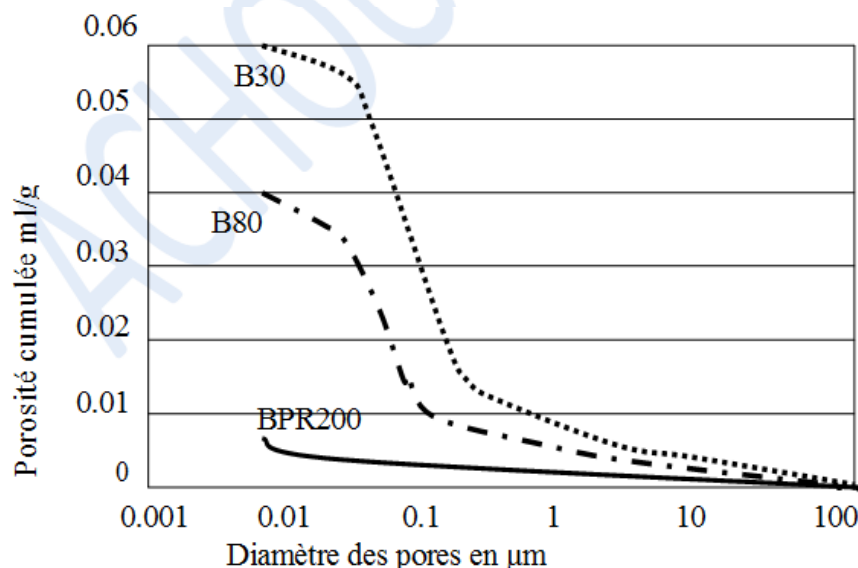
II -9 Durabilité des BPR

- La durabilité des BPR est caractérisée par les paramètres suivants
- Porosimétrie à mercure
- Perméabilité à l'air
- Absorption d'eau
- Diffusion des ions chlore
- Vitesse de carbonatation
- Vitesse de corrosion des armatures

Diffusion des ions chlore la présence des ions chlore à proximité d'armatures métalliques constitue une cause majeure de corrosion. Compte tenu de la très faible porosité du BPR, la diffusabilité des ions chlore est à priori très inférieure à celle de BO

Porosimétrie :

La résistance à la pénétration d'agent agressif dans les matériaux cimentaire est principalement liée par la taille et la porosité cumulée. la porosité cumulée des BPR en comparaison des autres types de béton est illustrée dans la figure suivante :



Vitesse de corrosion de l'armature

L'altération des aciers est le résultat des réactions chimiques. La chute du PH causée par la carbonatation de la matrice ou la présence des ions chlore peut déclencher le processus de corrosion.

La structure compacte des BPR offre une résistance ohmique très élevée en comparaison. Cela contribue à freiner le passage de courants électrique de nature ionique, ce qui ralentira toute réaction de corrosion.

D'une façon générale la vitesse de corrosion des armatures inférieures est de l'ordre de 0.01 à 0.02 $\mu\text{m}/\text{an}$ (seuil de corrosion 1 $\mu\text{m}/\text{an}$).

Vitesse de carbonatation

Les résultats des tests de carbonatation, mesurée après traitement accéléré à 100% de CO_2 , montrent que le coefficient de carbonatation du béton B30 atteint 50mm/an par contre aucune carbonatation n'a pu être détectée sur les BPR. L'excellente résistance des BPR à la pénétration d'agents agressifs traduit un très bon comportement de ce matériau vis-à-vis de la durabilité conduisant à une augmentation importante de la durée de vie des ouvrages.