

## LES BETONS DE POUDRES REACTIVES

*Badreddine BOUALI Ingénieur principal à la Direction Générale des  
Batiments Civils Ministère de l'Équipement et de l'Habitat et de  
l'Aménagement du Territoire*

**RESUME :** Le béton, matériau de base depuis plus d'un siècle n'a évolué de façon significative qu'à partir des années quatre vingt avec la mise au point de bétons à haute performance (B.H.P). Aujourd'hui, le béton étape dans la révolution du matériau. Au-delà de l'amélioration des performances mécaniques que le BPR a apporté, il convient de s'interroger sur les avantages et les inconvénients que ce nouveau matériau peut entraîner dans le domaine de la sécurité et de la santé des salariés qui le mettent en œuvre. C'est cette démarche et son état d'avancement qui seront présentés ci-après.

**ABSTRACT :** The concrete , basic material more than one century did not evolved to a significant degree only as from the years eighty with the developement concrete with high performance (B.H.P)/

Today, the reactive powder concrete BPR seems to mark a new step in the revolution of material .Beyond the improvement of the mechanical performances that the BPR brought, it is advisable to wonder about the advantages and the inconvenients that this new material can involve in the work men who implement il.

It is this step and its state of advance wich will be presented in the next.

**تلخيص :** إن مادة الخرسانة تعتبر من أهم مواد البناء الذي كثر إستعمالها في العالم خلال القرن الماضي وذلك لما لها من خصائص ميكانيكية هامة, وخلال العشرية الأخيرة من القرن الماضي , أدت البحوث إلى إنتاج تركيبة جديدة من الخرسانة الغير كلاسيكية والمسماة خرسانة ذات مسحوق مشع « Béton à poudre reactive » والمتكونة أساسا من خليط من الإسمنت والرمل و مسحوق الكوارتز و السيليس والألياف المعدنية وذلك بمقادير مختلفة . وهذا ما أدى إلى إعطاء هذه المادة فاعلية قياسية, إلا أن إستعمالها لم يكن مكثفا بالصفة المرجودة وبقي منحصر في بعض أشغال الهندسة العسكرية مثل المراكز النووية والحصون الأرضية وبعض الجسور بسبب إرتفاع تكلفة إنتاجها, أما من ناحية أخرى فإن لهذه المادة سلبيات عديدة على الرغم من إيجابياتها و ذلك لتأثيرها على الصحة والسلامة المهنية كما أن عدم إتخاذ التدابير الوقائية اللازمة عند إنتاجها قد تؤدي إلى ظهور أمراض خطيرة لمستعملها.

## **PREAMBULE**

Le béton, matériau de base depuis plus d'un siècle n'a évoluée de façon significative qu'à partir des années quatre vingt avec la mise au point de bétons à hautes performances (BHP).Aujourd'hui, le béton de poudres réactives (BPR) semble marquer une nouvelle étape dans la révolution du matériau.

Au-delà de l'amélioration des performances mécaniques que la BPR a apporté, il convient de s'interroger sur les avantages et les inconvénients que ce nouveau matériau peut entraîner dans le domaine de la sécurité et de la santé des salariés qui les mettent en œuvre. C'est cette démarche et son état d'avancement qui seront présentés ci-après.

### **1 PROPRIETES DU BPR**

#### **1.1 LES PRINCIPES DIRECTEURS**

Les caractéristiques exceptionnelles des bétons de poudres réactives résultent de l'application de quatre principes fondamentaux :

- ◆ Amélioration de l'homogénéité par suppression des gros granulats.
- ◆ Amélioration de la ductilité par ajout de micro-fibres métalliques
- ◆ Augmentation de la compacité par optimisation du mélange granulaire et éventuellement par pressage.
- ◆ Amélioration de la microstructure par traitement thermique.

#### **1.2 LA COMPOSITION**

Les BPR sont fabriqués dans des conditions semblables à celles des bétons classiques mais avec une très faible quantité d'eau puisque le rapport eau/liant est sensiblement égal à 0,15.

Le BPR est composé d'un mélange de sable, de ciment, de fumée de silice, de farine de quartz, de fibres métalliques et d'eau.

L'adjonction d'un super plastifiant permet d'assurer la rhéologie du mélange.

#### **1.3 LES QUALITES ET LES PERFORMANCES DU BPR**

Le béton de référence de la gamme des BPR : le BPR 200 a les caractéristiques mécaniques suivantes :

- ◆ Résistance à la compression : 200 MPa
- ◆ Résistance à la traction directe : 7 à 12 MPa
- ◆ Résistance à la traction par flexion : 30 à 55 MPa
- ◆ Energie de fracturation : 30 000 j/m<sup>2</sup>
- ◆ Densité : 2,45

Le dosage des fibres métalliques, l'application d'une pression pendant la prise et le traitement thermique sont des paramètres variables qui permettent d'améliorer les performances du BPR de références pour obtenir le BPR 800.

La résistance en compression qui a longtemps été la seule qualité exigée d'un béton a été multipliée par un facteur 4 à 10 dans le cas du BPR 200.Mais l'intérêt de ce nouveau matériau réside aussi dans :

- Sa durabilité
- Son étanchéité
- Son aspect de surface

Ces différentes caractéristiques étendent considérablement son champ d'utilisation.

La microstructure est la clé de la performance des BPR ; elle leur confère :

- ◆ Une très faible porosité
- ◆ Une perméabilité à la limite du mesurable
- ◆ Une durabilité exceptionnelle

Comparé à un béton classique, on observe un changement structural complet des hydrates qui se traduit par une structure continue de la phase liante à l'échelle microscopique. Au niveau macroscopique, la matrice du BPR constitue un milieu quasi imperméable à l'air et aux agents agressifs tels que les ions chlorures.

L'autre avantage de l'absence de pores capillaires est la très grande résistance au gel-dégel. Enfin, l'adjonction de micro-fibres métalliques confère aux BPR une résistance à la traction élevée et une grande ductilité qui leur permettent d'être utilisés sans armatures passives dans les structures.

## **2 MISE EN ŒUVRE**

### **2.1 LA FABRICATION**

La fabrication du BPR utilise la technologie des centrales à béton traditionnelle. L'emploi de poudres sèches nécessite le stockage en silos ou l'utilisation de sacs. Quelques modifications sont nécessaires pour réaliser un BPR de qualité constante : l'eau doit être dosée avec une grande précision pour respecter scrupuleusement le rapport E/C déterminant la rhéologie du béton.

L'emploi d'un malaxeur possédant un pouvoir de dispersion important pour suppléer l'absence de gros granulats qui ont pour effet de concasser et de disperser le ciment et les fines des bétons ordinaires.

Le cycle du malaxage se décompose de la façon suivante : homogénéisation à sec, fluidification de la pâte par ajout de l'adjuvant mélangé à l'eau de gâchage, ajout et dispersion des fibres métalliques à l'aide de trémies doseuses vibrantes.

### **2.2 MISE EN PLACE**

La finesse des poudres utilisées et la rhéologie du produit fini permettent l'emploi de méthodes inhabituelles pour les bétons, en particulier la mise en place par injection.

## **3 DIFFERENTES APPLICATIONS DU BPR**

### **3.1 APPLICATION DANS LES TRAVAUX DE BATIMENT ET DE GENIE CIVIL**

Les caractéristiques mécaniques du BPR permettent de réaliser des structures fines et élancées avec une réduction importante du volume du matériaux à mettre en œuvre. L'absence d'armatures, massives offre une grande liberté pour la définition des géométries.

L'emploi de la précontrainte est facilité par les caractéristiques du produit.

-La passerelle de Sherbrooke (Canada), d'une portée de 56 mètres, est constituée de voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont composés d'un hourdis nervuré en BPR de 30 mm d'épaisseur assemblé aux diagonales en BPR confiné dans des tubes inox par précontrainte miniaturisée. Cette structure très raide à une épaisseur moyenne de 15 cm seulement.

-Les poutres en béton supportant les panneaux d'échange des structures internes des aéroréfrigérants des centrales électronucléaires sont placées dans un environnement extrêmement agressif.

L'utilisation du BPR permet d'améliorer considérablement leur durabilité.

Le BPR est aussi utilisé comme revêtement de façades. La mise en place de panneaux plans ou courbés de plusieurs mètres carrés coulés en plaques minces de 10 à 15 mm d'épaisseur est facilité par leur moindre poids.

### **3.2 APPLICATIONS INDUSTRIELLES**

La stabilité dimensionnelle, la facilité de mise en forme, la résistance à l'abrasion et les propriétés de confinement du matériau sont les principales caractéristiques demandées au BPR dans l'industrie.

- Bâti pour machine-outils. Le BPR est utilisé en substitution de la fonte. Sa stabilité dimensionnelle est garantie à 10 microns.
- Container Haute Intégrité (CIII) pour le stockage de déchets, radioactifs de catégorie B (faible radioactivité et longue durée de vie).
- Dalle filtre pour l'épuration des eaux usées.
- Revêtement de sols et blocs de scellement de machines en milieu industriel agressif.

## **4 BPR ET ECOLOGIE**

### **4.1 TENEUR EN CIMENT DU BPR**

Le BPR détient plus de ciment qu'un béton traditionnel mais ses performances mécaniques et de durabilité permettent une réduction importante des volumes globaux de béton mis en oeuvre. Prenons l'exemple de la passerelle de Sherbooke au Canada.

Malgré un fort dosage en ciment, l'épaisseur équivalente de l'ouvrage ( volume global des matériaux de la superstructure divisée par l'épaisseur du tablier) est considérablement diminuée par rapport à une solution traditionnelle. Ainsi la quantité globale de ciment utilisée et les émissions de CO<sub>2</sub> qui sont liées à sa production sont réduites de 60%.

### **4.2 AUTRES CONSTITUANTS DU BPR**

Outre le ciment, le BPR contient une quantité importante de fumée de silice qui sont des sous-produits industriels. Il s'agit donc d'un recyclage. Les autres constituants sont le sable, le quartz broyé qui n'ont pas d'impact nocif sur l'environnement. De plus, le BPR permet d'économiser les granulats dont les réserves sont limitées.

### **4.3 VIEILLISSEMENT DU BPR**

Le BPR présente une grande durabilité qui lui permet de résister aux agressions diverses du milieu extérieur tant physiques (abrasion) que chimiques (pénétration des sels de déverglaçage et carbonatation) . Le BPR possède une réserve de ciment anhydre qui lui procure un potentiel d'auto-cicatrisation.

La pérennité des ouvrages et structures en BPR sera très supérieure à celle des bétons traditionnels . Les réparations seront moins nombreuses.

### **4.4 INTEGRATION DANS L'ENVIRONNEMENT**

Le BPR, en raison de ses performances mécaniques très élevées, permet de diminuer les volumes de béton mis en jeu. Conjugé à l'absence d'armatures passives, ceci laisse une large place aux innovations du point de vue de la conception des structures et de leur intégration environnementale. La ductilité du BPR rendra les structures plus minces même en cas de surcharges exceptionnelles .

### **4.5 PRESERVATION DE L'ENVIRONNEMENT**

La mise au point d'un conteneur à haute performance à Haute intégrité en BPR destiné à l'entrepasage des déchets radioactifs devrait permettre de contribuer à apporter une solution durable à l'un des problèmes environnementaux du siècle présent.

#### **4.6 RECYCLAGE DU PRODUIT**

La grande durabilité du BPR alliée à la réduction des volumes des structures rend ce problème moins crucial et moins actuel que pour le béton ordinaire. Cependant, on peut dire que l'une des difficultés rencontrées lors de la démolition des ouvrages en béton est la découpe et le tri des armatures métalliques passives. Avec les ouvrages en BPR, ce problème n'existera plus. De plus, le BPR ainsi récupéré pourrait servir de substitut aux granulats pour bétons traditionnels.

#### **5 PRIX**

Le prix d'un mètre cube de BPR mis en place est 10 à 12 fois plus cher que le béton ordinaire ou à hautes performances.

Mais la problématique de l'économie d'un matériau ne se limite pas au seul aspect de son coût unitaire ; l'économie globale du projet à court, moyen et long terme doit, évidemment être prise en compte pour apprécier l'intérêt du recours à un matériau plutôt qu'à un autre.

D'ores et déjà, le BPR présente des avantages économiques par rapport à ses concurrents :

##### \*Absence d'armatures passive

Le travail long et coûteux de calcul, de dessin, de façonnage, et de mise en place des armatures passives pour les structures en béton est avec le BPR purement et simplement supprimé.

##### \* Diminution des poids des structures

Du fait du rapport des densités, les structures en BPR sont aussi légères que celles en acier mais deux à trois fois moins lourdes que celles en béton. Il en résulte un gain parfois considérable sur les structures porteuses ou les fondations.

##### \*Diminution de l'encombrement

L'amincissement des structures procure un gain esthétique indéniable et parfois aussi un gain économique pour l'exploitant : davantage de places de parking grâce à des poteaux plus petit, plus d'étages dans des tours de grande hauteur...

##### \*Pérennité des ouvrages

La durabilité du BPR assure aux structures situées dans des milieux agressifs une longévité supérieure qui peut se traduire par des gains d'exploitation importants.

#### **6 RISQUES DUS AU BPR**

Puisque le matériau est nouveau, les mesures de prévention se sont donc principalement appuyées sur la revalidation des risques conduits à partir de la toxicité connue des composants ainsi que de leur mise en œuvre.

##### **6.1 RISQUES DUS AU CIMENT**

Le ciment utilisé est un ciment Portland traditionnel et contient principalement des silicates et des aluminates de calcium.

Le pH du ciment dans l'eau est de 12 à 13.

Le caractère basique entraîne, par contact, des effets caustiques sur la peau et des irritations des voies aériennes supérieures. Le ciment contient au titre d'impuretés

dues à la fabrication des traces de nickel, de chrome et de cobalt susceptibles de déclencher des réactions allergiques de la peau lors des contacts fréquents.

### **6.2 RISQUES DUS A LA FUMÉE DE SILICE**

La silice micronique communément appelée fumée de silice, est composée de très fines particules dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$ .

Elle est un co-produit de la fabrication de silicium et de ses alliages. La réduction du quartz en présence de carbone à 2000° C produit d'une part le silicium ou son alliage ou d'autre part des fumées de monoxyde gazeux : (Si O<sub>2</sub>) qui s'oxyde et se condense presque immédiatement en particules extrêmement fines de silice micronique (Si O<sub>2</sub>) .

Ces particules de forme sphérique sont constituées de silice amorphe donc sans risque théorique pour la santé.

Cependant, compte tenu de leur diamètre extrêmement fin, ces particules sont inhalables et présentent le risque d'irritation des voies aériennes et de surcharges alvéolaires.

S'agissant de poussières sans effets spécifiques, la valeur limite réglementaire des poussières alvéolaires est fixée à 5 mg/m<sup>3</sup> .

### **6.3 RISQUES DUS A LA FARINE DE QUARTZ**

Il s'agit en fait de silice broyée dont la granulométrie est comprise entre 0 et 40 micromètres. Elle est obtenue par concassage puis broyage de quartzite.

La forme essentiellement cristalline de la silice ainsi obtenue est particulièrement nocive en inhalation.

Une exposition prolongée et/ou massive à ce type de poussière peut provoquer la silicose, qui est une fibrose pulmonaire causée par le dépôt dans les poumons de particules de silice cristalline de taille alvéolaire . La concentration moyenne en silice cristalline libre, des poussières alvéolaires de l'atmosphère inhalées par un travailleur pendant une journée de travail de 8 heures a été limitée de 0,1 mg/m<sup>3</sup> à 1 mg/ m<sup>3</sup> selon la réglementation française.

### **6.4 RISQUES DUS A L'ADJUVANT**

Lors de la préfabrication en usine et pendant le malaxage du mélange sec en même temps que l'eau, est incorporé un super plastifiant.

Ce produit défloculant permet de réduire dans des conditions considérables la teneur en eau du béton tout en conservant la fluidité nécessaire à sa mise en œuvre.

La toxicité de l'adjuvant utilisé serait évaluée à partir de la fiche de données de sécurité communiquée par l'entreprise.

Le super plastifiant utilisé, toxique par ingestion ou par contact, a donc une toxicité spécifique susceptible d'être surajouté à la toxicité du ciment .

## **7 MESURES DE PREVENTION**

L'examen des risques relatifs à chaque composant nous permet d'envisager les deux voies privilégiées de pénétration des composants du BPR dans l'organisme :

- \* Les pathologies cutanées donc de contact avec le produit
- \* Les pathologies respiratoires donc d'inhalation des poussières.

Cet examen du risque nous permet de proposer des mesures de prévention suivantes.

- Eviter les risques.
- Evaluer les risques qui ne peuvent pas être évités.
- Combattre les risques à la source.
- Tenir compte de l'état d'évolution de la technique
- Remplacer ce qui est dangereux, par ce qui ne l'est pas ou par ce qui est moins dangereux.
- Planifier la prévention en y intégrant dans un ensemble cohérent la technique, l'organisation de travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants.
- Prendre des mesures de protection collectives en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelles .
- Donner des instructions appropriées aux travailleurs.

### **7.1 PATHOLOGIE DE CONTACT**

Elles sont dues à deux des composants du BPR, le ciment et l'adjuvant. L'application des principes généraux de prévention a conduit :

- ◆ A proposer l'utilisation d'un adjuvant moins toxique que l'adjuvant choisi à l'origine.
- ◆ A supprimer les contacts possibles avec le mélange avant séchage.

Par la mécanisation des opérations les pathologies de contact ont été réduites considérablement. C'est ainsi que lors de préfabrication en usine, le mélange est coulé et mis en place par injection sous dégazage en coffrage fermé.

### **7.2 PATHOLOGIES RESPIRATOIRES**

Elles sont dues principalement à la farine de quartz risque de silicose mais aussi à la fumée de silice : poussière sans effet spécifique mais contenant des particules alvéolaires.

Le choix de la mesure de prévention s'est porté sur la mise en dépression et filtration des poussières de l'installation .Cette mise en dépression concerne l'installation depuis les trémies doseuses jusqu'au malaxeur pour la préfabrication en usine, jusqu'au système d'ensachage.

### **7.3 MISE EN ŒUVRE SUR LE CHANTIER**

- ◆ Le BPR se coule comme un béton traditionnel avec des outils de malaxage et de mise en place performante, mais classique. L'utilisation du BPR ne pose donc aucune difficulté particulière.
- ◆ L'absence d'armatures passives simplifie la préparation des pièces et leur coulage. Les structures en BPR apportent donc un confort de travail supplémentaire.
- ◆ La mise en œuvre est faite sur chantier. Les mesures de prévention sont donc à prendre dans le cadre des plans d'hygiène, de santé et de sécurité spécifique à chaque chantier.
- ◆ préleveur est donc obligé d'ôter le masque de protection contre les poussières pour parler avec son collègue, d'où l'inefficacité du masque.

## **8 CONCLUSION**

Il serait prématuré de tirer des conclusions sur les risques et les mesures de prévention dus à la mise en œuvre du béton de Poudres réactives.

D'une part, l'utilisation de ce nouveau matériau n'a pas atteint son « régime de croisière ». Les modes opératoires de la préfabrication ou de la réalisation du premix seront sans doute encore sujets à des modifications.

D'autre part, l'utilisation sur chantier n'a pas encore été observée en Tunisie. de ce fait, la phase généralement la plus dangereuse, qui est la mise en œuvre sur le terrain n'a pas été étudiée dans le cadre de ce document.

Au-delà de l'intérêt présenté par les mesures de prévention proposées ici, mesures qui ne sont pas figées et qui suivront l'évolution des modes opératoires, c'est l'avantage de la démarche de prévention, dans le cadre de la veille technologique qui est illustrée par le cas du BPR que nous devons souligner.

Cette démarche a l'inconvénient d'être difficile dans la mesure où rien n'est totalement observable, ou seuls les documents tels que les fiches de données de sécurité ou les connaissances bibliographiques sont disponibles.

Elle a l'avantage de permettre une réelle anticipation des risques et de ce fait de faciliter l'intégration des mesures de prévention dans les modes opératoires.

Enfin les mesures proposées dans le cadre d'une telle démarche sont des mesures réellement « préventives », déterminées avant la manifestation et l'apparition du risque, donc bien avant les mesures de prévention correctives prises après les accidents.

#### **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Rapport des actes du colloque « La sécurité et la santé dans la construction au 21<sup>ème</sup> siècle » (6-8 /11-1999) Vienne