

Définition du BCR

Il n'existe pas de définition du Béton Compacté au Rouleau (BCR) à la fois simple et rigoureuse. Il en existe par contre de mauvaises comme celle qui consiste à présenter le BCR comme un matériau intermédiaire entre le sol et le béton ce qui évoque immédiatement l'idée d'un « sous-béton ».

En fait, le BCR est avant tout un béton destiné à réaliser de gros massifs et mis en place à l'aide des engins de travaux publics utilisés pour réaliser des remblais (barrages, fondations...).

De ce mode de réalisation résulte des conséquences immédiates :

- l'énergie utilisée pour mettre en place le béton est supérieure à celle des aiguilles vibrantes usuelles. A égalité de qualité des granulats et de quantité de liant, on peut donc obtenir des bétons qui, au sein des couches successives, ont des propriétés supérieures à celles du béton vibré ;

- par contre, comme pour les remblais, les zones au voisinage de deux couches successives ont des propriétés différentes de celles de l'intérieur des couches ;

- les modalités de mise en place permettent des cadences de réalisation beaucoup plus grandes que celles des bétons traditionnels, d'où des avantages économiques très importants : diminution du prix unitaire du béton, réduction de la durée globale du chantier, diminution sensible des coffrages...

Cette dualité entre la nature du matériau - béton - et son mode de mise en place - sol - explique que dans l'étude du BCR l'on ait recours à des modes d'approche ou des types d'essais relevant de chacune de ces techniques.

Par ailleurs, dans les premières heures suivant le malaxage, le BCR se comporte comme un sol (réglage, compactage) ; au bout de quelques jours c'est un béton indéformable ; entre les deux c'est un matériau aux propriétés mal connues, et cette méconnaissance est à l'origine de la plupart des questions que l'on se pose à propos du BCR.

Aspects béton du BCR

Comme tout béton le BCR est un mélange de granulats inertes, de liant et d'eau.

Liant

En ce qui concerne le liant, l'expérience montre que l'on a utilisé des produits très divers, depuis des CPA purs, jusqu'à des liants totalement dépourvus de clinker, en passant par tous les intermédiaires (clinker additionné, en proportions très diverses, de pouzzolanes naturelles ou artificielles, de cendres volantes...).

Il ne faut toutefois pas en déduire que le choix du liant est indifférent. Mais on peut, en fonction du ou des produits disponibles localement, définir des formulations et, surtout,

des modes de mises en place adaptés au liant retenu : par exemple, on n'envisagera pas de cendres volantes dans les zones où les centrales thermiques ne consomment que des hydrocarbures.

Bien entendu on aura intérêt, comme pour tout ouvrage massif en béton, à choisir des liants à faible exothermie. Et, dans le cas du BCR on aura intérêt à choisir des liants qui font prise lentement. En effet, il est indispensable - ou au moins très souhaitable - que, lorsque l'on superpose les couches successives du BCR, la couche inférieure ait encore des propriétés très proches de celles d'un sol (c'est-à-dire qu'elle soit déformable sans altération de ses propriétés) ; on peut obtenir ce résultat soit en imposant à l'entrepreneur des contraintes de mise en place strictes, et donc coûteuses, soit en adoptant des liants lents. C'est le parti qui a été adopté en France où tous les barrages ont été réalisés avec des produits d'origine sidérurgique additionnés éventuellement de cendres volantes¹. Tout avantage a évidemment son revers, et les pressions exercées par le béton des couches inférieures sur les organes de confinement (coffrages...) sont plus importantes lorsque la prise est lente.

Granulats

On dit parfois que l'on peut réaliser un BCR avec des granulats impropres à la réalisation de bétons traditionnels. C'est vrai et c'est faux. En matière de béton traditionnel il existe des règles et, ce qui est pire, des usages qui veulent que l'on ne peut mettre en œuvre que des granulats d'excellente qualité. Les efforts faits en France actuellement pour utiliser d'autres matériaux (cf. les Projets nationaux relatifs à l'utilisation des bétons de sable ou des matériaux locaux) montrent bien que ces usages constituaient d'inutiles carcans.

De la même façon, certains des spécialistes étrangers qui ont développé le BCR ont pris conscience que les bétons antérieurement utilisés pour construire des barrages de hauteur moyenne avaient en fait des propriétés très largement excédentaires et qu'il devait être possible de s'affranchir des prescriptions usuelles. Comme il n'existait pas de règles pour le BCR, ils ont eu toute latitude de choix, et l'expérience leur a donné raison. Mais un résultat analogue aurait sans doute été obtenu si ces mêmes granulats inhabituels avaient été utilisés pour construire des barrages-poids en béton vibré. Les barrages-poids auraient alors été moins coûteux et n'auraient peut-être pas été aussi systématiquement supplantés par les barrages en remblai.

Eau et serrage

Si ce n'est ni le liant, ni les granulats qui caractérisent le BCR, qu'est-ce qui fait la spécificité de ce produit ? C'est essentiellement le rouleau, c'est-à-dire l'énergie de compactage. Dans un béton l'eau intervient évidemment dans la réaction chimique de prise, mais pour une faible partie de son volume ; elle est avant tout un lubrifiant permettant l'organisation du squelette granulaire². Dans un béton tradi-

¹ Par contre dans les barrages étrangers, on a toujours utilisé des produits à base de clinkers avec, quelquefois, des additions supérieures à 50 %.

² Et dans certains cas, le transport du béton.

tionnel, au moment où la vibration est mise en œuvre, le matériau se liquéfie, et chaque particule est totalement entourée d'eau au moment de sa mise en place. Dans un BCR, l'eau sert également de lubrifiant – comme lors de la mise en place d'un sol ou d'un enrochement – mais il en faut moins, et les granulats sont au contact les uns des autres (ce qui permet au rouleau de ne pas s'enfoncer) la compacité est supérieure, et donc les caractéristiques mécaniques, à teneur égale en liant.

On peut noter au passage qu'il est difficile de mesurer la compacité sur un chantier où l'on a par contre la possibilité de mesurer les densités ; on a donc pris l'habitude de considérer que le bon béton est un béton dense ; ceci est inexact si la densité élevée résulte de l'emploi de granulats de masse spécifique élevée ; c'est vrai par contre si la densité élevée provient d'un bon serrage des granulats. Il est important de ne pas confondre les deux notions.

Il est possible qu'une fragilité élevée des granulats interdise un compactage énergétique. Ces granulats ne seront pas forcément inutilisables, mais il faudra alors augmenter la teneur en liant avec toutes les conséquences qui en résultent (augmentation de prix, accroissement de l'échauffement).

On pourra également augmenter la teneur en liant dans les zones du barrage où le compactage ne peut être bien assuré (voisinage des appuis, parement aval non coffré...), quoique l'expérience ait montré que des augmentations, mêmes fortes, ne parvenaient pas toujours à compenser l'insuffisance du compactage.

La compacité du squelette et les contacts entre granulats avant le début de prise limitent évidemment, voire empêchent, le retrait en cours de prise, ce qui est bien évidemment un avantage complémentaire.

Matériaux fins

Les granulats lavés (c'est-à-dire débarrassés des éléments d'un diamètre inférieur à 60 ou 80 micromètres) constituent à peu près 75 à 80 % du volume total d'un béton, cette valeur pouvant varier notamment en fonction de la forme des granulats, de la courbe granulométrique et, dans une moindre mesure de l'énergie de serrage.

La différence entre les différents types de béton résulte essentiellement des 20 ou 25 % restant.

Dans un béton usuel on pourra utiliser par exemple une centaine de litres d'eau (10 % en volume) et 250 kg de ciment (10 % en volume également). On obtient un matériau plein – au moins au moment de sa mise en œuvre – dans lequel la pâte enveloppe tous les granulats lors de la vibration.

Un BCR a des propriétés mécaniques tout à fait suffisantes pour construire un barrage lorsqu'il comporte une centaine de kilos de liant et une centaine de litres d'eau, mais il reste alors 5 % de vides, ce qui est incompatible avec l'obtention d'une bonne homogénéité au sein de chaque couche (la pâte ayant tendance à rester ou à descendre dans la partie inférieure).

C'est là toute l'origine de la querelle – d'autant plus féroce qu'elle est vaine – entre les tenants des faible et forte teneurs en pâte.

Tous les spécialistes sont d'accord pour remplir totalement les vides ; tout au plus certains auront-ils tendance à mettre un peu plus que le

volume théorique de vide laissé libre par les granulats tandis que d'autres n'hésiteront pas à accepter 1 % à 2 % de moins.

Toute la différence réside dans la nature du matériau utilisé pour combler ces vides.

Pour les uns – et c'est l'approche béton – on ne peut utiliser que des produits parfaitement définis et contrôlés, c'est-à-dire des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes. Indépendamment de leurs propriétés pouzzolaniques qui ne peuvent qu'être bénéfiques, ces cendres, qui sont composées de sphérules facilitent la mise en place des granulats et permettent la réduction de la teneur en eau. Mais ces pouzzolanes ou ces cendres volantes peuvent être très coûteuses dans certaines zones géographiques.

Pour les autres – et c'est l'approche sol – on peut utiliser les fines naturellement présentes dans les sols, ce qui ne coûte rien et évite un lavage. Évidemment il faut faire attention à la nature chimique de ces fines, vérifier qu'elles ne provoqueront pas d'altérations ultérieures du béton (argile) et qu'elles ne présentent pas d'incompatibilité avec les liants utilisés (surtout si ces derniers sont des liants non normalisés). Il faut en effet se souvenir que tous les matériaux très fins sont susceptibles de réactions chimiques (il suffit de se rappeler que le charbon transformé en poussier est un explosif mortel). Ceci explique qu'avec des teneurs identiques en liant, des granulats naturels non lavés aient permis d'obtenir des propriétés mécaniques très différentes du BCR. Certaines fines naturelles ont en fait des propriétés « antipouzzolaniques ».

Cendres volantes

Les cendres volantes méritent un développement particulier : on désigne en effet sous ce nom des produits très différents... et souvent sans en avoir conscience.

La très grande majorité des cendres volantes produites par les centrales thermiques sont des cendres volantes de houille et sont très pauvres en calcaire (cendres volantes de classe F dans la terminologie des États-Unis) ; elles sont essentiellement constituées de silico-aluminates. Elles sont donc inertes sauf en présence d'un excès de calcium apporté par le clinker du ciment. Lorsque l'ajout de cendres est faible (de l'ordre de 20 à 30 %), celles-ci participent totalement à la réaction de prise ; lorsqu'il est très élevé (de l'ordre de 60 %), il est vraisemblable qu'une partie ne participe pas à la réaction mais constitue des fines de remplissage d'excellente qualité, et ceci d'autant plus que, dans une petite proportion, elles se substituent à l'eau.

Au contraire les cendres volantes utilisées en France ont été jusqu'à présent des cendres de lignite³. Les stériles contenus dans le lignite et injectés dans les chaudières de centrale ont une composition voisine du cru utilisé dans les cimenteries ; les cendres sont alors de véritables liants hydrauliques qui peuvent faire prise de façon autonome (cendres volantes de classe C dans la terminologie USA). Leur rôle dans un BCR – ou un béton vibré – sera donc tout autre que celui des précédentes.

Aspects sol du BCR

Venons-en à la mise en œuvre : lorsqu'il sort du malaxeur le BCR se présente comme un sol

³ Il en est de même en Grèce, par exemple.

très caillouteux et légèrement humide qui peut se transporter avec tous les engins couramment utilisés pour les sols : tapis, camions. Il se régale puis se compacte comme un sol... à ceci près que les rouleaux ont toujours des billes lisses et vibrantes et non des billes à pied de moutons. Les cadences de mise en œuvre sont donc très élevées : des montées de 1 m par jour ne sont pas exceptionnelles (car les surfaces des massifs sont beaucoup plus réduites que dans un barrage en terre) et plusieurs massifs de barrages d'une trentaine de mètres de haut ont été réalisés aux États-Unis en un mois (il n'est d'ailleurs pas sûr que de telles cadences correspondent à l'optimum ; elles pouvaient résulter de l'utilisation d'un liant trop rapide).

Il convient toutefois d'être très attentif à quelques différences entre la réalisation des massifs en terre et en BCR.

Si la teneur en eau d'un sol est souvent de l'ordre de 15 à 20 %, celle d'un BCR est voisine de 4 à 5 % ; une même perte d'eau aura donc des effets beaucoup plus nocifs dans le second cas que dans le premier. Le BCR sera, pour la même raison, plus sensible que la terre à une légère pluie.

Même si le liant est lent, il est indispensable de procéder rapidement à la mise en place du matériau, et de façon très régulière (le fonctionnement de la centrale à béton doit être aussi constant que possible) ; l'organisation du chantier doit être très stricte.

Il faut réduire dans toute la mesure du possible ce qui peut réduire les cadences de mise en œuvre (réalisation de galeries...).

Aspects « non solides »

Après avoir présenté les aspects béton et sol du BCR, il est nécessaire de s'étendre sur la période intermédiaire, qui va de quelques heures à quelques jours après la fabrication du béton.

L'évolution du béton traditionnel pendant cette période est mal connue, car c'est celle pendant laquelle on laissait, sur les barrages en béton vibré, le béton évoluer à l'intérieur de ses coffrages.

On assiste à une perte de mobilité progressive qui s'explique à la fois par la diminution de la teneur en eau libre (une partie est mobilisée par les réactions chimiques), le grossissement des grains de liant, puis l'apparition d'hydrates de dimensions plus importantes.

Mais la vitesse et, sans doute, la nature des phénomènes sont très variables d'une formulation à l'autre.

La diminution des teneurs en clinker semble ralentir les phénomènes ; une dessiccation superficielle (vent, soleil) l'accélère.

L'évolution du matériau pendant cette période, si elle est encore mal connue, est toutefois essentielle dans le mode d'exécution des « reprises » d'une couche avec la précédente, dans les qualités à exiger ou à rechercher pour celles-ci, dans l'action du béton sur les coffrages, dans celle du rouleau sur les couches inférieures en cours de prise, sur la vitesse de montée du massif.

Les reprises constituent le domaine qui demeure le plus mal connu en dépit de son importance. Car autant il est facile de multiplier en laboratoire les essais sur éprouvettes pour étudier l'influence de la teneur ou de la nature des liants, la teneur et la nature des fines, de la courbe granulométrique... autant il est difficile de reproduire deux couches successives en modélisant l'action du compacteur sur chacune de ces couches.

Or le comportement du massif dépend autant des propriétés du BCR à l'intérieur des couches que de celles des quelques centimètres situés au voisinage du contact des deux couches successives.

Anisotropie du BCR

Contrairement au béton vibré, que l'on peut considérer, à l'intérieur d'un volume suffisant (quelques dizaines de dm³), comme un matériau isotrope, le BCR est un matériau anisotrope ; cette anisotropie intéresse aussi bien les résistances mécaniques que la perméabilité ; elle intervient à petite comme à grande échelle.

A grande échelle, ce qui a été mentionné ci-dessus au sujet des reprises suffit à l'expliquer. Il convient d'observer que certains ingénieurs s'efforcent de réaliser des BCR homogènes, c'est-à-dire d'améliorer la qualité de reprises pour qu'elles ne constituent plus des points faibles. Un tel résultat n'est pas impossible à obtenir mais il coûte très cher, surtout si on veut être en mesure de le garantir en tout point, et le prix d'un tel BCR se rapproche de celui des bétons vibrés traditionnels.

D'autres ingénieurs, au contraire, estiment préférable d'utiliser le BCR tel qu'il se présente spontanément, c'est-à-dire comme un matériau feuilleté, et de concevoir des dessins de barrages adaptés.

L'hétérogénéité à petite échelle est moins évidente : chaque granulats a une forme plus ou moins allongée et se couche sous l'action du buteur d'abord, puis du rouleau. Lorsque l'on réalise ensuite des essais en traction, on a généralement recours à la méthode brésilienne sur des carottes prélevées verticalement, et la traction s'exerce donc dans la direction préférentielle des granulats. C'est peut-être tout simplement de là que provient l'affirmation selon laquelle le rapport R_t/R_c est plus élevé pour les BCR que pour le béton vibré.

Optimisation

Ce qui précède peut donner une certaine impression de confusion :

- on peut faire du BCR avec des liants très variés et avec des teneurs très différentes ;
- on peut utiliser des granulats très variés, depuis des alluvions fluviales ou des matériaux de carrière prélevés directement dans leur gîte, sans traitement ni lavage jusqu'à des granulats triés, lavés, associés à des fines parfaitement connues ;
- on peut vouloir réaliser un massif homogène ayant partout des résistances élevées à la traction ou se contenter d'utiliser un matériau feuilleté et présentant une assez forte perméabilité horizontale ;
- on peut donc inévitablement aboutir à des prix unitaires très différents.

Alors qu'il existe presque des schémas-types pour des barrages-poids en béton vibré, l'ingénieur qui envisage un barrage en BCR retrouve une très grande liberté de choix et d'adaptation aux situations locales : disponibilité en liant ou en pouzzolanes (naturelles ou artificielles), en granulats, en matériels de travaux publics.

Bien entendu sur un site donné, toutes les possibilités ne seront pas envisageables : l'ingénieur n'aura que deux ou trois - au maximum - catégories de BCR à envisager. Il devra concevoir pour chacune d'elles un dessin de

barrage adapté, et ce n'est qu'à l'issue d'un certain nombre d'allers et retours entre le matériau et le barrage, qui seront tous deux progressivement précisés, que le choix de la meilleure solution pourra intervenir. D'une manière générale, on aura à comparer des ouvrages volumineux en BCR bon marché et des profils plus réduits en BCR coûteux.

En particulier des barrages à profil à peu près symétrique peuvent constituer la meilleure solution dans des zones sismiques ou lorsque les fondations sont en rocher fracturé.

Compactage

Il s'agit là d'un point délicat sur lequel les avis divergent comme pour les reprises et pour des raisons analogues : il est très coûteux et pratiquement impossible de multiplier les planches d'essais, sauf pour les très grands ouvrages.

Faut-il préférer les amplitudes de vibrations grandes ou faibles ? les rouleaux très lourds ou moyens ? L'expérience du constructeur joue un rôle important.

Quelques éléments se dégagent toutefois :

- les engins utilisés pour les travaux routiers conviennent toujours ; il n'est pas nécessaire de rechercher des matériels spécialement adaptés aux barrages en BCR ;

- les compacités obtenues en laboratoire sur les éprouvettes d'essais classiques peuvent presque toujours être dépassées sur le chantier ;

- un compactage énergétique est nécessaire mais ne doit pas conduire à écraser les plus gros granulats en surface ;

- il est possible qu'un compacteur bien adapté à un matériau alluvionnaire (granulats lisses) ne le soit pas pour des granulats de carrière ; on peut être donc conduit à tester plusieurs appareils ;

- les modalités exactes de compactage (nombre de passes lisses, vibrantes, à faible ou forte amplitude...) doivent être déterminées de façon rigoureuse sur des planches de convenance lors de chaque chantier, et l'on doit ensuite respecter strictement les procédures ainsi déterminées (sauf à procéder à de nouveaux essais en cours de chantier si nécessaire) ;

- il existe toujours des zones dans lesquelles le compactage pose des problèmes particuliers : fond de fouille et voisinage des appuis, voisinage de certains parements... Il convient alors, soit d'utiliser localement du béton vibré, soit de mettre au point des modalités de compactage particulières (appareils plus légers sur des couches moins épaisses...);

- on peut enfin rappeler que les ingénieurs japonais réalisent une partie importante du compactage du BCR à l'aide de buteurs lourds travaillant le matériau en couches minces.

Étanchéité

Le BCR n'est pas un matériau naturellement très imperméable ce qui est rédhibitoire pour un barrage. Des solutions très diverses existent pour y parer ; elles se regroupent en deux grandes catégories :

- réaliser un massif de béton imperméable ;

- définir un BCR imperméable, mais coûteux,

- étaler un microbéton entre chaque couche de BCR, au moins à l'amont du barrage ;

- placer une étanchéité distincte et séparée à l'amont du massif ;

- géomembrane nue ou protégée,

- mur amont en béton banché armé,

- ...

Là aussi il s'agit de définir une solution optimisée en fonction des propriétés du BCR et du profil du barrage.

Contrôle de chantier

Il a été indiqué ci-dessus que la définition du traitement des reprises et les décisions à prendre en cours de chantier à la suite des impondérables inévitables (précipitations, journées très chaudes ou très froides, incidents d'exécution) étaient difficiles à quantifier et à exprimer. Cet état de chose est parfaitement rendu par trois phrases extraites du guide *Roller-Compacted concrete from the US Army Corps of Engineers*⁴.

Il y a de nombreuses modalités de construction mises en œuvre sur les chantiers de BCR qui ne peuvent être définies de façon rigoureuse et qui ont néanmoins des répercussions importantes sur la qualité obtenue. Les exigences en matière de contrôle de qualité susceptibles de garantir une bonne exécution ne sont pas bien définies.

Exiger de l'entrepreneur le strict respect des « tables de la loi » conduirait dans certains cas à des retards inutiles ou peut entraîner plus de mal que de bien.

Le bon sens et la collaboration entre les contrôleurs du gouvernement et le constructeur pour mettre au point et définir les mesures à prendre en temps voulu pour s'adapter aux différentes circonstances conduiront au résultat le meilleur et le plus économique.

Bibliographie

A paraître aux Presses des Ponts et chaussées :
Le béton compacté au rouleau (projet national BACARA).

⁴ There are many construction procedures used in RCC production that are not defined precisely but, nevertheless, significantly impact RCC production quality. The CQC requirements, intended to ensure that RCC production procedure are accomplished correctly, are not well defined.

Requiring the contractor to meet « the letter of law » may under some circumstances result in unnecessary delays or cause more problems than solutions. Judgment and cooperation between the government inspector and the contractor in developing and agreeing on procedures to be taken ahead of time for various changing conditions will result in the most economical and highest quality product.