

Béton hydraulique

Béton à haute résistance

par **Roger LACROIX**

Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées

1. Choix des constituants.....	C 2 212 – 2
1.1 Ciment	— 2
1.2 Granulats	— 2
1.3 Adjuvants	— 2
2. Composition du béton	— 3
2.1 Dosage en ciment.....	— 3
2.2 Dosage du mélange.....	— 3
3. Coût et justification	— 3
4. Autres propriétés	— 3
5. Béton à très haute résistance.....	— 4

Les bétons traditionnels peuvent être classés approximativement en trois classes, en fonction de leur résistance moyenne (mesurée sur cylindre à 28 jours) (cf. [C 2 210] ; réf. [6]) :

- bétons de faible résistance, **10 à 20 MPa**, utilisés pour des ouvrages massifs, des murs banchés, etc. ;
- bétons de résistance usuelle, **20 à 40 MPa**, utilisés pour les structures en béton armé de bâtiment ou de travaux publics ;
- bétons de résistance élevée, **40 à 55 MPa**, souvent réservés aux ouvrages précontraints, ou aux éléments préfabriqués ou dont on souhaite un décoffrage rapide.

Cependant, dès le début du siècle, des bétons d'une résistance très supérieure à ces valeurs étaient produits, au moins à titre expérimental ; c'est ainsi que Considère pouvait doubler la résistance à la compression au prix, cependant, d'un fretage prohibitif qui restreignait l'emploi de ce matériau. Dès avant la Seconde Guerre mondiale, Eugène Freyssinet obtenait, pour une fabrication de poteaux précontraints par pré-tension, des résistances moyennes de l'ordre de 60 MPa.

Dans les années 60, il était possible d'obtenir, en laboratoire, des résistances de l'ordre de 100 MPa, sans pour autant que ces résultats soient directement transposables au chantier.

D'autres recherches sur le béton à haute résistance furent menées, avec succès, à l'occasion de la conception des cuves de réacteurs nucléaires en béton précontraint, pour la filière à eau bouillante : en 1970, le Laboratoire des Bétons du Commissariat à l'Énergie Atomique avait mis au point un béton de granulats légers, susceptible d'être produit couramment sur le chantier, et dont la résistance moyenne était de l'ordre de 70 MPa (cf. [BN 3 740], réf. [7]).

Cependant, mis à part quelques cas très particuliers, tels que ceux de poteaux de bâtiments élevés, le béton à haute résistance n'a pas connu depuis lors le développement qu'il méritait.

Ce n'est que récemment qu'un regain d'intérêt s'est manifesté pour les résistances élevées, notamment en matière d'ouvrages d'art, de bâtiments de grande hauteur, ou d'ouvrage en mer (offshore). Plusieurs actions de recherche ont été entreprises, avec pour objectif l'obtention sur chantier d'une résistance

caractéristique de l'ordre de 60 MPa, et cela avec des ciments et granulats normalement disponibles sur le marché, excluant le recours à des mélanges ou imprégnations de résines ou autres ingrédients d'un prix prohibitif.

Il s'agit donc d'obtenir, par des méthodes simples et de manière fiable et industrielle, un béton de haute qualité ; il s'agit en outre de vérifier que les autres caractères de ce béton sont compatibles avec son emploi dans une construction.

Parmi ceux-là, on peut citer :

- la maniabilité du béton frais ;
- la résistance à la traction ;
- le module élastique ;
- la ductilité ;
- la résistance aux agents agressifs et au gel, etc.

1. Choix des constituants

On se reportera utilement à l'article [C 2 210], réf. [6].

La qualité du béton est bien entendu fonction de celle de ses constituants : ciment, granulats, eau. L'idée de base des recherches entreprises est d'effectuer une sélection suffisante pour obtenir la résistance souhaitée, sans pour autant renchérir de façon prohibitive le coût des matériaux.

Le transport des matériaux représente, en effet, une fraction importante de leur coût, qui devient insupportable dès que la distance de leur source au lieu d'utilisation dépasse quelques dizaines de kilomètres pour les granulats, et une centaine de kilomètres pour le ciment. Il est donc hors de question de se montrer trop exigeant en imposant des conditions trop restrictives ; en revanche, une attention particulière doit être apportée aux proportions du mélange, au choix de l'adjuvant et aux conditions de mise en œuvre.

1.1 Ciment

Les normes françaises NF P 15-301 (*Liants hydrauliques. Ciments courants. Composition, spécifications et critères de conformité*) et NF P 15-010 (*Liants hydrauliques. Guide d'utilisation des ciments*) distinguent, pour les ciments, des **catégories** qui définissent leur composition et des **classes** de résistance.

Parmi les différentes catégories disponibles, ce sont les ciments CPA (Portland artificiels) qui constituent le meilleur compromis entre haute résistance et disponibilité, car la plupart des cimenteries françaises les fabriquent, et leurs caractères sont plus réguliers que ceux des ciments CPJ (Portland avec ajouts). Quant au ciment alumineux, qui peut conduire à des résistances très élevées, sa mise en œuvre est très délicate et il est peu répandu, si bien qu'en pratique, il est réservé à des travaux spéciaux, et notamment aux cas où l'on souhaite un durcissement très rapide, de l'ordre de quelques heures.

Les classes de résistances sont au nombre de quatre : 35, 45, 55 et HP (Hautes Performances). Pour un béton à haute résistance, seules les deux dernières sont à considérer, et la classe 55 est souvent préférée à la classe HP, trop peu répandue.

En résumé, le choix doit se porter de préférence sur le ciment **CPA 55** (ou éventuellement HP) avec, si possible, une faible teneur en aluminat tricalcique, ce qui le rend apte à l'emploi dans les ouvrages à la mer.

1.2 Granulats

Il est d'usage de dire que les granulats constituent le squelette du béton, ce qui traduit le fait que, presque toujours, ils sont plus durs que la pâte de ciment qui les enrobe. Mais la résistance propre du granulat est supérieure à celle du béton : le mécanisme de rupture du béton par compression est donc assez complexe ; il fait intervenir les qualités de forme et d'adhérence des granulats, aussi bien que leur résistance mécanique.

Des granulats trop durs, et surtout de dimensions trop importantes, peuvent provoquer des concentrations de contraintes : selon de nombreux auteurs, les meilleurs bétons sont réalisés avec des granulats de dimensions inférieures à 15 mm ; le rapport adhérence/résistance augmente en effet lorsque la taille des granulats diminue.

De même, pour les bétons à très haute résistance, les granulats concassés sont supérieurs aux roulés, dont la surface extérieure est plus faible à volume égal. Enfin, certains granulats légers ont donné de très bons résultats, en raison de leurs qualités d'adhérence, et parce que l'eau qu'ils absorbent constitue une réserve interne au béton qui permet à l'hydratation du ciment de se poursuivre après durcissement de la pâte ; mais leur fabrication en France est extrêmement réduite.

En résumé, pour les granulats autres que le sable, l'idéal serait un concassé assez dur, de taille moyenne, de bonne adhérence, avec une forme la plus cubique possible (absence de plaquettes et d'aiguilles).

Le sable joue un rôle essentiel dans la résistance du ciment, son **module de finesse** doit être **inférieur à 2,5** ; un ajout de 5 à 10 % de fines de 0,2 à 0,4 mm procure un effet bénéfique sur la plasticité du béton, sans nuire à la résistance. Enfin, pour un béton de qualité, **l'équivalent de sable** doit être **supérieur à 75**.

1.3 Adjuvants

L'emploi d'un fluidifiant est essentiel pour obtenir un béton de résistance élevée ; les fluidifiants sont le plus souvent des acides organiques hydrocyclophiles (naphtalènes) ou des ligno-sulfates. Leur effet principal est d'abaisser la tension superficielle de l'eau et de défloculer le ciment, ce qui provoque une augmentation considérable de la fluidité du béton.

L'usage des fluidifiants est aujourd'hui moins répandu en France que dans la plupart des grandes nations industrielles, en raison de l'existence d'une certaine méfiance à l'égard de l'emploi des adjuvants, de façon générale. Cependant, les résultats obtenus avec ces produits sont souvent spectaculaires et ils méritent certainement un développement important.

La proportion d'adjuvant rapportée au poids du ciment est de l'ordre de 2 à 3 % ; elle doit être précisée par le fournisseur, car les fluidifiants du commerce sont plus ou moins dilués, et souvent mélangés à un retardateur de prise.

Grâce à leur action de dispersion des grains du ciment, les fluidifiants permettent d'augmenter, de façon spectaculaire, l'ouvrabilité d'un béton, à teneur en eau égale ; ils permettent aussi, à ouvrabilité égale (mesurée au Cône d'Abrams ou, de préférence, au maniabilité-mètre) de diminuer le rapport E/C du poids d'eau au poids de ciment, et donc d'obtenir un béton de bien meilleure résistance. On sait, en effet, que la proportion d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment est de l'ordre de 0,25 ($E/C = 0,25$) : or, pour un bon béton courant, le rapport E/C ne descend guère en dessous de 0,45, le complément d'eau ayant simplement pour rôle de délayer la pâte, afin de la rendre plus fluide. Grâce à l'emploi d'un fluidifiant, il est possible d'arriver à des valeurs de E/C comprises entre **0,30 et 0,35** et d'augmenter ainsi la résistance du béton.

En revanche, les fluidifiants ont parfois donné lieu à des échecs en raison de leur faible durée d'efficacité : l'action dispersante de l'adjuvant ne dure que 30 à 45 min après son mélange à l'eau de gâchage et passé ce délai, le béton frais revient à un état identique à celui d'un béton sans adjuvant, ce qui peut rendre impossible sa mise en place dans les coffrages, étant donné sa faible teneur en eau. Cet inconvénient est sensible surtout dans le cas de béton prêt à l'emploi livré par camions, avec une incertitude sur le temps de transport. Le temps d'efficacité des fluidifiants peut être allongé par le recours à un retardateur ; on peut aussi différer l'introduction d'une partie du fluidifiant dans le mélange jusqu'à l'arrivée du camion sur le chantier, la proportion exacte entre les deux parts étant déterminée par l'expérience.

2. Composition du béton

2.1 Dosage en ciment

À partir du minimum de 300 kg de ciment par mètre cube de béton en œuvre imposé pour les ouvrages en béton armé, la résistance croît avec le dosage ; cependant, un dosage trop élevé en ciment présente plusieurs **inconvénients** :

- tout d'abord, le **prix du ciment** est beaucoup plus élevé que celui des granulats, et l'incidence d'un surdosage sur le prix du béton n'est pas négligeable ;
- le **retrait** et le **fluage** du matériau durci sont d'autant plus importants que sa teneur en ciment est plus forte ;
- enfin, la **chaleur d'hydratation** croît aussi avec le dosage, et un béton trop riche peut être le siège de températures élevées qui engendrent des contraintes indésirables et qui imposent des précautions spéciales pendant la cure, afin d'éviter une fissuration précoce.

En pratique, un dosage de 400 kg de ciment par mètre cube de béton en œuvre est courant pour un ouvrage précontraint, et le dosage optimal, déterminé par des essais en laboratoire, dépasse rarement 450 kg/m³. Il est d'ailleurs toujours préférable, lorsque c'est possible, d'agir sur la qualité du ciment plutôt que sur sa quantité.

2.2 Dosage du mélange

La répartition des différents constituants et leur courbe granulométrique sont affaire d'expérience et chaque laboratoire préconise sa formule, souvent la mieux adaptée aux matériaux locaux.

Une granulométrie discontinue conduit souvent à une meilleure résistance ; elle exige en contrepartie une vibration plus énergique à la mise en place. L'important est de parvenir à un mélange assez compact, avec une proportion de fines suffisante pour remplir complètement les vides du squelette de gravillons.

Notons enfin que la composition d'un béton à haute résistance représente souvent un optimum *pointu* : une faible variation du dosage de l'un des constituants, et en particulier de l'eau (dont la précision doit être du litre), peut entraîner une chute de résistance importante. Par exemple, une variation de 2 à 3 L d'eau peut provoquer une diminution de la résistance de 10 MPa.

Il en résulte que le béton à haute résistance exige un contrôle de qualité plus rigoureux que le béton ordinaire, circonstance qu'il faut prendre en compte dans une comparaison économique.

3. Coût et justification

Le surcoût d'un béton à haute résistance par rapport à un bon béton courant provient de quatre facteurs qui sont :

- le ciment, en qualité et en dosage ;
- la qualité des granulats ;
- l'adjuvant fluidifiant ;
- le renforcement du contrôle de qualité.

Les écarts peuvent être importants d'une région à l'autre, suivant la disponibilité des granulats et du ciment, matériaux pondéreux dont le transport sur une longue distance grève notablement le prix de revient du béton ; il est donc difficile d'être précis. De la même façon, le coût du renforcement du contrôle de qualité s'amortit mieux sur une fabrication à gros débit, qui peut justifier la présence à plein temps, sur le chantier, d'un technicien qualifié.

Ceci étant, on peut évaluer de 15 à 20 % l'augmentation du prix du béton en œuvre, lorsque sa résistance caractéristique s'élève de 35 à 60 MPa.

On voit ainsi que l'augmentation relative du prix est très inférieure à l'augmentation relative de la résistance ; mais cette comparaison ne suffit pas pour justifier son emploi car, dans la plupart des ouvrages, les dimensions des éléments de béton sont souvent imposées par d'autres considérations que la résistance :

- considérations esthétiques ;
- isolation phonique ;
- facilité de mise en place du béton dans les coffrages, etc.

Il en résulte que, sous l'angle du coût de construction, le béton à haute résistance ne se justifie, comme nous l'avons dit, que pour certaines catégories particulières d'ouvrages. Cependant, lors de la conception d'une construction, il convient de considérer, non pas son coût de construction, mais son coût global qui comprend en outre la surveillance, l'entretien et les réparations éventuelles de la structure. De ce point de vue, le béton à haute résistance présente un avantage certain, quoique difficilement chiffrable ; en effet, en raison de sa faible teneur en eau, ce matériau est beaucoup plus compact et moins perméable que le béton courant. Il est donc bien moins sensible à la carbonatation ou à la pénétration des chlorures, et le risque de corrosion des armatures s'en trouve très réduit ; la durabilité des constructions en béton à haute résistance est ainsi très supérieure à celle des ouvrages courants. À elle seule, cette considération suffit pour en justifier l'emploi ; il faut noter, en effet, que le prix du béton ne représente qu'une faible part de celui d'une construction terminée ; un supplément de coût de 15 à 20 % sur le matériau ne représente donc que quelques pour-cent du coût global de l'ouvrage ; il constitue une bonne assurance, eu égard aux troubles que peuvent apporter des travaux de réparation sur un ouvrage en service.

4. Autres propriétés

La plupart des règlements de calcul actuels, en particulier les Règles BAEL (cf. articles spécialisés dans ce traité) et BPEL, comportent des articles restreignant leur domaine de validité à celui des bétons classiques dont la résistance caractéristique ne dépasse pas 40 MPa.

À la suite de plusieurs séries d'essais effectuées sur des bétons d'une résistance moyenne de 70 à 80 MPa, il est possible, jusqu'à des valeurs de cet ordre, de résumer ainsi les résultats obtenus.

- **Résistance à la traction** : l'expression réglementaire actuelle, soit $f_t = 0,6 + 0,06f_c$ (en MPa), convient encore, bien que f_t croisse moins vite que f_c ; cette expression, en effet, est très prudente pour les bétons courants.

- **Module de déformation** : le module E_i croît moins rapidement que ne l'indique la formule des règles ($E_i = 11\,000f_c^{1/3}$ en MPa) ; il paraît raisonnable de limiter sa valeur à 40 000 MPa.

- **Diagramme contraintes/déformations** : pour les vérifications usuelles à l'état limite ultime, on utilise un diagramme parabole-rectangle, ou rectangulaire simplifié, et l'on admet que la rupture du béton en compression est atteinte pour une déformation de 2 ‰ en compression simple et 3,5 ‰ en flexion.

Pour un béton à haute résistance, la valeur de 2 ‰ en compression simple paraît raisonnable ; en revanche, la déformation ultime de 3,5 ‰ en flexion devrait être ramenée à 3 ‰.

Il n'y a pas lieu de modifier le coefficient de sécurité partiel 0,85/1,5 normalement appliqué au béton.

- **Déformations différées** : le gain sur les déformations de retrait n'est pas significatif ; au contraire, le coefficient de fluage doit être réduit de 30 % environ en raison de la moindre teneur en eau du béton. Cet écart n'est pas négligeable pour les structures en béton précontraint, car les pertes de tension des armatures actives sont réduites d'autant.

- **États limites de service** : les conditions de fissuration et les dispositions constructives diverses destinées essentiellement à conférer aux structures en béton une ductilité suffisante semblent pouvoir s'appliquer sans changement.

5. Béton à très haute résistance

En laboratoire surtout, mais aussi sur chantier, des résistances encore plus hautes ont été atteintes, jusqu'à des valeurs dépassant **100 et même 120 MPa**, en moyenne, sur cylindre à 28 jours.

Mais ces bétons ne peuvent être obtenus, en général, que grâce à l'addition de **microsilice** (en anglais *silica fume*) ; il s'agit d'un sous-produit de la fabrication de certains alliages qui provient de la filtration des fumées ; la microsilice est une poudre impalpable, formée presque exclusivement de silice, dont les grains ont un diamètre moyen de quelques dixièmes de micromètre.

La microsilice, plus fine que le ciment, permet de mieux remplir les vides laissés entre les grains de celui-ci ; elle présente en outre des propriétés pouzzolaniques et son rôle est donc à la fois chimique et mécanique.

La microsilice est utilisée dans plusieurs pays, notamment en Norvège pour la construction de plates-formes *offshore*, et au Canada, dans des usines de préfabrication où l'on souhaite raccourcir le cycle de séchage et de durcissement du béton.

La quantité de microsilice nécessaire pour obtenir une résistance de 90 MPa environ est de l'ordre de 10 à 15 % du poids de ciment au minimum. Cette proportion est importante, comparée à celle d'un simple fluidifiant, et les ressources de l'industrie métallurgique risqueraient d'être insuffisantes si l'emploi de bétons à très haute résistance se développait. C'est pourquoi plusieurs études ont été engagées, afin de vérifier s'il est possible de remplacer la microsilice par des granulats finement broyés.

Par ailleurs, contrairement au béton contenant simplement un fluidifiant, le béton à très haute résistance semble fragile et sa faible ductilité peut constituer un obstacle sérieux à son emploi dans les structures. De même, certaines expériences qui restent à préciser semblent montrer que sa résistance aux cycles de gel-dégel, au moins dans les conditions très sévères qui sont celles de la normalisation française actuelle, est inférieure à celle d'un béton normal, en raison de sa trop faible porosité qui ne permet pas à l'eau de trouver un volume d'expansion lors de sa transformation en glace.

Concernant le sujet, le lecteur pourra se reporter aux références [1], [2], [3], [4] et [5].

Références bibliographiques

- [1] VENUAT (M.). – *Bétons à hautes résistances mécaniques. Objectifs à atteindre et principes à respecter*. Le Moniteur. Septembre 1983.
- [2] JOBSE (H.J.) et MOUSTAFA (S.W.). – *Applications of High Strength Concrete for Highways Bridges*. Journal of the P.C.I. Mai/juin 1984.

- [3] *State of the Art Report on High Strength Concrete*. ACI Journal n° 4 vol. 81. Juillet/août 1984, p. 364-411.
- [4] BUIL (M.) et PAILLÈRE (A.M.). – *Utilisation de fillers ultra-fins dans le béton*. Symposium International sur les granulats. Novembre 1984.
- [5] *High-Strength Concrete*. ACI. 1985. Publication spéciale SP-87.

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [6] BERNIER (G.). – *Formulation des bétons*. [C 2 210] 05 - 2004.
- [7] BOUNIOL (P.). – *Bétons spéciaux de protection*. [BN 3 740] 04 - 2001.