1. **Les bétons à ouvrabilité graduée**

Indépendamment de ses caractéristiques à l’état durci, le béton doit avoir à l’état frais une consistance adaptée à la technique de mise en œuvre retenue pour la réalisation d’un élément structurel. Pour cela, le béton peut être fabriqué dans une très large gamme de consistances allant de la « terre humide » à un véritable fluide pouvant s’écouler et se mettre en œuvre sous son propre poids.

 **1.1- Les bétons de consistance ferme**

Les bétons extrudés sont des bétons coulés en continu par coffrage glissant pour réaliser des dispositifs de retenus en béton - séparateurs simples ou doubles en bétons adhérents (glissières GBA ou DBA) - sur autoroute, ainsi que des ouvrages d’assainissement.

Le béton, décoffré alors qu’il est encore frais et que sa prise n’a pas eu lieu, doit supporter son poids propre sans déformations inacceptables ; il est donc nécessaire d’avoir un béton très ferme / raide à l’état frais.

D’autres cas nécessitent l’utilisation d’un béton de consistance ferme, lorsque l’on veut une résistance au très jeune âge (6 / 7 heures) élevée ou encore pour des applications comme la réalisation des chaussées en béton ou des pistes d’aéroport.

Les bétons de consistance ferme sont qualifiés au moyen d’un essai au cône d’Abrams (S : 10 à 40 mm) voire préférablement par un essai Vébé (V : 5 = à 30 secondes), tel que décrit dans la norme EN 12350-3, qui consiste à mesurer un temps d’affaissement du béton frais soumis à vibration.

1. ***Formules de béton à extruder***

Le béton, qui doit présenter un affaissement de l’ordre de 30 mm, est mis en œuvre par des machines à coffrage glissant (figure 2) et doit respecter une formulation très précise et rigoureusement constante. C’est un béton dosé à raison de 330 à 350 kg/m 3 de ciment et comportant une teneur en fines élevée (15 % d’éléments < 0.063 mm) tels les fillers calcaires ou du sable fillérisé. La capacité du béton à présenter une stabilité mécanique immédiate après mise en œuvre est obtenue grâce à un choix de granulats adaptés (forme anguleuse de préférence), une teneur en eau limitée (rendue possible grâce à l’utilisation d’un plastifiant).

Dans le cas de travaux routiers, le béton devra en plus présenter une résistance suffisante aux cycles de gel/dégel et aux sels de déverglaçage, ce qui est obtenu en ajoutant un adjuvant entraîneur d’air permettant de stabiliser un réseau de microbulles d’air.



 Fig 2 Machine à extruder pour glissière séparatrice d’autoroute en béton.

1. ***Formules de béton routiers ou de pistes d’aéroport***

Les bétons routiers ou pour chaussées aéronautiques ne sont pas fondamentalement différents des bétons pour ouvrage d’art, néanmoins le choix des constituants et la définition de leurs proportions dans le mélange doivent être déterminés afin d’obtenir des performances adaptées au mode de mise en place ( machine à coffrage glissant ) et aux sollicitations particulières que supportent les chaussées (sollicitations de flexion, usure superficielle et tenue aux cycles de gel/dégel et aux sels de déverglaçage). Le choix des granulats sera fait en tenant compte des exigences de la norme XPP 18-545, notamment en ce qui concerne leur dureté, leur sensibilité au gel et leur friabilité. Outre l’adjonction d’un plastifiant permettant la limitation de la quantité d’eau de gâchage, un adjuvant entraîneur d’air sera systématiquement utilisé. Enfin, puisque la résistance à la flexion du béton non armé est un aspect primordial, ce paramètre (par fendage sur éprouvette cylindriques ou par essais de flexion sur prismes) devra être mesuré.

1. ***Les bétons de préfabrication***

La production industrielle (figure 3) en très grande quantité d’éléments préfabriqués comme les voussoirs de tunnel requiert de maximiser la réutilisation des moules et donc de minimiser le temps passé par la pièce dans le coffrage. Dans les cas extrêmes on cherchera à faire 3 cycles par 24 heures et il est donc indispensable que le béton présente des caractéristiques mécaniques suffisantes (12 / 15 MPa) au bout de 6 à 7 heures pour pouvoir être décoffré (figure 5). Par ailleurs, le nombre de pièces étant très important, les volumes de béton le sont également et il est nécessaire de peaufiner l’optimum technico-économique du produit, ce qui conduit le plus souvent à retenir des bétons fermes ayant une Durée Pratique d’Utilisation (DPU) réduite (de l’ordre de 30 minutes) et une résistance à 28 jours de l’ordre de 40 MPa.

Ces bétons très fermes sont très exigeants, d’une part ils requièrent une maitrise quasi parfaite de la quantité d’eau de gâchage, d’autre part l’opération de vibration (voire d’hyper vibration) nécessaire au parfait remplissage des moules est délicate à mettre au point et les travaux de finition (réglage et talochage sont pénibles (figure 4)). C’est pourquoi, aujourd’hui, la solution radicalement opposée consistant à mettre en œuvre des bétons auto-plaçant est de plus en plus utilisée pour la préfabrication classique et qu’elle est expérimenté - avec des résultats prometteurs - pour la préfabrication de voussoir de tunnel.

Les bétons de consistance intermédiaire (plastique à fluide) Il s’agit des bétons traditionnels, dont l’affaissement est compris entre [50 - 90], [90 -150] et [160 -210] mm, coulés en place dans la plupart des chantiers de bâtiments et / ou de génie-civil. Il convient seulement de mentionner que la tendance depuis quelques années déjà est d’utiliser des bétons de consistance de plus en plus fluide. Cela peut s’expliquer par le fait que les plastifiants et superplastifiants modernes permettent de formuler des bétons à forte ouvrabilité malgré un dosage réduit en eau et qu’il est également plus commode, avec ce type d’adjuvants, de garantir le maintien de consistance dans le temps d’un béton frais pour des consistances plus élevées (S : 180 +/- 30 mm) que pour des consistances intermédiaires

(S : 150 +/- 30 mm).



Figure 3- Vue d’ensemble usine de préfabrication de voussoirs à postes fixes.

  

Figure 4- Opération de talochage Figure 5- Décoffrage et manutention en sortie

 du voussoir. de poste d’étuvage

**1.2- Les bétons de consistance très fluide**

Partout où il n’est pas possible de mettre en œuvre l’opération de vibration nécessaire au bon remplissage et au bon compactage (ou serrage) du béton, il est nécessaire de mettre en œuvre des bétons de consistance très fluide afin que ceux-ci puissent se mettre en œuvre de manière satisfaisante. Un certain nombre d’applications requiert ce type de bétons comme par exemple les bétons utilisés pour les fondations profondes ou coulés sous l’eau.

1. ***Les bétons de fondations profondes non vibrés***

Ces bétons doivent être très fluides et relativement peu visqueux, ils ne doivent pas présenter de phénomènes de ségrégation et avoir une susceptibilité au ressuage très faible. Le béton étant injecté par le bas et la colonne de béton remontant le long du pieu ou de la paroi jusqu’à la fin du bétonnage, il est nécessaire que l’ouvrabilité du béton soit maintenue pendant une durée supérieure à celle nécessaire au bétonnage du pieu (typiquement supérieur ou égale à 4 heures) ; ce point est un aspect prépondérant pour la formulation du béton.

Les bétons de fondations profondes sont formulés avec un volume important d’éléments fins (au minimum 385 kg/m 3 de particules inférieures à 0.063 mm, incluant le ciment) permettant de limiter la ségrégation et le ressuage, et une synergie adéquate d’adjuvants (généralement un superplastifiant et un retardateur de prise) permettant le maintien d’une rhéologie adéquate dans le temps.

1. ***Les bétons coulés sous l’eau***

La spécificité des bétons coulés sous l’eau réside dans les conditions de mise en œuvre en aveugle du béton sans possibilité de vibration. Les propriétés du béton frais et les paramètres de formulation sont donc voisines de celles des bétons de fondations profondes décrites dans le paragraphe précédent.

En sus des caractéristiques de durabilité et de résistance, les points clefs suivants doivent être respectés :

* Choix d’un béton de consistance S3 ou S4 (voire auto-plaçant) pour permettre le pompage, assurer une répartition homogène dans le coffrage ou en fond de fouille et pour ne pas avoir besoin de serrer le béton ;
* Utilisation d'un tube-plongeur qui évitera la ségrégation et la désagrégation du mélange ;
* Choix d’une granulométrie riche en éléments fins avec au moins 400 kg/m 3 de passant au tamis de 0,063 mm ;
* Utilisation d'un adjuvant agent de cohésion spécifique pour donner au béton une cohésion qui permettra de limiter le phénomène de délavage sans diminuer la maniabilité.

**1.3- Les bétons auto-plaçant : bétons coulés en place ou préfabriqués**

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l’état frais et leur capacité de moulage, d’enrobage et de compaction par le seul effet de la gravité.

On définit ainsi par BAP : un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction s’effectue par le seul effet gravitaire).

Le cas particulier des bétons projetés Il est parfois nécessaire de mettre en œuvre une paroi de béton plus ou moins épaisse et orientée dans n’importe quelle position (horizontale, verticale, en plafond) sans utiliser de coffrage. C’est le cas pour la réalisation des confortements de soutènement en souterrain, pour le soutènement de talus, ou la réparation d’ouvrages.

On utilise alors la technique du béton projeté qui doit être capable de se raidir et de rester en place dès son contact avec la paroi lorsqu’il est projeté avec une vitesse adéquate, soit parce qu’il contient une faible quantité d’eau (voie sèche), soit parce qu’un activateur chimique (accélérateur de prise spécifique sans alcalins) a été introduit en bout de lance (voie mouillée).

Dans les deux cas, la qualification et l’expérience des opérateurs qui mettent en œuvre le béton (dosage en eau ou adjuvant lors de la mise en œuvre, distance par rapport à la paroi, ...) est absolument primordiale, notamment pour limiter les phénomènes de rebond.

Il est possible d’obtenir des bétons performants (> 35 MPa), par exemple pour des revêtements définitifs de tunnel, avec la technique du béton projeté.

Les bétons projetés sont formulés de manière analogue aux bétons coulés en veillant à minimiser le diamètre du plus gros gravillon (< 12 mm) et augmenter la proportion de sable par rapport au gravillon. Le dosage en liant est généralement voisin de 400 kg/m 3. Ils peuvent incorporer une certaine quantité de fibres métalliques (généralement entre 20 et 35 kg/m 3) voire de macrofibres synthétiques structurelles (entre 6 et 8 kg/m 3) pour éviter d’utiliser un treillis d’armatures sur la paroi.

On distingue deux méthodes de mise en œuvre du béton projeté :

1. ***La voie sèche***

La voie sèche se caractérise par l’emploi de mélanges (granulats + liant) sous forme pulvérulente (faiblement humide) et pulsés par de l’air comprimé à très grande vitesse (100 m/s) dans une conduite avec introduction de l’eau de gâchage au niveau de la lance de projection.

1. ***La voie mouillée***

La voie mouillée (flux dense) correspond à l’emploi de béton de consistance très plastique à fluide (grâce à l’emploi d’un superplastifiant) pompé à environ 0,30 m /s dans une conduite avec introduction d’air comprimé et d’un adjuvant raidisseur-accélérateur au niveau de la lance de projection.