

CHAPITRE 2 : FAIRE DU BETON

(p. 3)

Les exigences constructives portent principalement sur l'ouvrage après sa mise en service, et donc sur le béton à l'état durci : résistance mécanique, résistance au retrait, au gel et aux agents agressifs, perméabilité, résistance au feu... Ces exigences sont fixées par le concepteur, en concertation avec le maître de l'ouvrage. Il existe d'innombrables compositions de béton. Le choix, le dosage et les caractéristiques de chacun des constituants se trouvent à la base de la qualité finale du béton. Toutefois, ces constituants agissent les uns sur les autres. Dès lors, la mise au point d'une composition correcte est généralement un processus itératif.

(p. 4)

Les exigences de mise en œuvre se rapportent au béton frais. Lors de la composition d'un béton, il faut tenir compte de la forme de la construction, de la présence d'armatures, des circonstances sur chantier etc. En comparaison avec d'autres matériaux de construction, la qualité finale d'un béton est en grande partie entre les mains de l'exécutant du travail, c.-à-d. l'entrepreneur et son personnel.

(p. 5)

Le sable constitue, avec les gros granulats, le 'squelette pierreux' du béton à l'état durci. Au stade du malaxage et de la mise en œuvre du béton frais, le sable et la pâte de ciment forment toutefois le mortier qui fait fonction de lubrifiant du gros granulat.

(p. 6)

LA règle fondamentale pour un béton de qualité !

Dans la pratique, un rapport E/C le plus bas possible revient grosso modo à un demi-litre d'eau par kilo de ciment, y compris l'humidité des granulats (sable!) et l'eau contenue par les adjuvants éventuels.

Toutefois, environ seule la moitié de cette eau sera liée chimiquement au ciment, le reste étant nécessaire pour faciliter le malaxage et la mise en œuvre du béton frais. Tout excédent d'eau enfermée dans le béton lors du durcissement entraîne une structure moins compacte du matériau, et donc à une réduction de ses performances mécaniques et de sa résistance aux agents agressifs.

(p. 7)

Il est difficile d'obtenir un rapport E/C faible en diminuant la quantité d'eau lorsque le sable contient beaucoup de fines. En effet, il faut plus d'eau pour mouiller du sable fin qu'une même masse de sable gros.

(p. 8)

Il n'est possible d'obtenir un rapport E/C faible en augmentant la quantité de ciment que dans une certaine mesure, parce qu'un béton à teneur en ciment très élevée est plus sensible au retrait.

(p. 9)

Une granulométrie continue et étalée signifie un squelette pierreux (gravillons + sable) avec :

- 1) un minimum de vides à combler entre les grains, c.-à-d. une bonne gradation des grains, du plus petit au plus grand;
- 2) un minimum de surfaces à mouiller et à enrober, c.-à-d. le plus possible de gravillons et de forme compacte (cube ou sphère).

La figure montre les courbes de référence de 3 granulats courants, dont le diamètre maximum (Dmax) est de 8, 16 et 32 mm. Plus le Dmax croît, plus la quantité de sable (et donc de mortier) diminue.

(p. 10)

Question classique dans une centrale à béton. La figure ne montre qu'une des nombreuses solutions possibles. Le raisonnement pour arriver à cette solution est illustré aux pages suivantes.

(p. 11)

La figure montre la solution retenue pour les gros granulats. La fraction du plus gros granulat (8/22) a été fixée à 45 %. En ce faisant, la combinaison du 2/8 et 8/22 disponibles avoisine la courbe de référence inférieure.

(p. 12)

Cette figure montre la solution retenue pour la fraction sable. Le sable 0/2 s'avère trop gros. Sa courbe granulométrique ne correspond pas à la courbe de référence; la pompabilité du béton n'est pas assurée. La granulométrie peut être corrigée en remplaçant partiellement le sable 0/2 par du sable 0/1.

(p. 13)

La norme prévoit la possibilité de prescrire un béton en spécifiant sa composition. Dans ce cas, le concepteur/prescripteur intervient comme technologue du béton, qui – en connaissance de cause – choisit les granulats, le sable, le ciment, et éventuellement les adjuvants et les additions. Il calcule le dosage de chaque composant par m³ de béton, fixe le rapport E/C, etc.

Le cas échéant, il tient compte des circonstances particulières de mise en œuvre.

(p. 14)

Prescrire un béton en spécifiant sa composition – une question d'expérience et de savoir faire...

(p. 15)

Prescrire un béton sur base des performances souhaitées ('béton à propriétés spécifiées') signifie :

(1) se référer aux normes NBN EN 206-1 : 2001 et NBN B 15-001 : 2004 ; (2) indiquer la classe de résistance, le domaine d'utilisation, la classe d'environnement, la classe de consistance, le diamètre maximum des gravillons ; et (3) indiquer éventuellement des données complémentaires.

Seule cette méthode permet de prescrire un béton porteur de la marque BENOR. Du fait que la marque BENOR garantit la conformité du béton aux performances spécifiées, l'utilisateur doit simplement contrôler les bons de livraison et – bien entendu – l'exécution des travaux.

(p. 16)

La résistance à la compression 'caractéristique' est une valeur issue de l'analyse statistique des résultats d'un essai de compression : dans au moins 95 % des cas, les résultats enregistrés sont supérieurs à cette valeur.

Chacune des deux désignations est importante : la résistance sur cylindre $f_{ck\ cyl}$ est utilisée dans le calcul des constructions en béton, la résistance sur cube $f_{ck\ cube}$ intervient dans le contrôle de la qualité du béton.

Avant de choisir une classe de résistance, il y a lieu de vérifier la classe de résistance minimale exigée implicitement pour des raisons de durabilité. Voir prescription de la classe d'environnement.

(p. 17)

Le 'domaine d'utilisation' indique si le béton est non armé, armé ou précontraint. Pour chaque domaine d'utilisation, la norme définit la teneur maximale en ions chlore. Les chlorures peuvent être présents dans le ciment, les adjuvants, les granulats, etc. La teneur en ions chlore doit être limitée, car ils peuvent provoquer la corrosion des armatures.

(p. 18)

Les normes identifient 13 'classes d'environnement' (E-). Les abréviations se réfèrent aux termes anglais 'environnement' (E), 'interior' (I), 'exterior' (E), 'sea' (S) et 'agressive' (A).

En principe, une classe suffit à caractériser l'environnement auquel le béton sera exposé. Toutefois, dans le cas d'un environnement agressif, le prescripteur doit donner deux classes.

(p. 19)

Pour chaque classe d'environnement, et par domaine d'utilisation, les normes stipulent des exigences en matière de durabilité. Des combinaisons de rapport E/C maximal, dosage minimal en ciment, classe de résistance minimale, et (éventuellement) teneur en air minimale sont traduites par des 'types de béton'.

Le cas échéant, d'autres exigences peuvent également être ajoutées, par ex. type de ciment, résistance au gel des granulats, conditions liées à l'utilisation de cendres volantes...

(NB : Lorsque la classe de résistance minimale associée au type de béton s'avère plus élevée que la classe de résistance choisie initialement, il faudra réexaminer ce choix !)

(p. 20)

Dans certains cas, la classe de résistance et/ou la classe d'exposition nécessitent un faible rapport E/C et une teneur élevée en ciment. Afin d'obtenir l'ouvrabilité souhaitée, il sera nécessaire d'ajouter un adjuvant, par exemple un superplastifiant.

(NB : Ces essais ne conviennent pas pour mesurer l'ouvrabilité d'un béton auto-plaçant.)

(p. 21)

Un D_{max} faible implique une quantité de mortier importante et donc une teneur en ciment élevée. Dès lors, il peut arriver que le dosage en ciment soit plus grand que celui qui correspond à la classe de résistance ou à la classe d'exposition.

(p. 22)

Il existe une interaction entre la plupart de ces exigences. Le respect de chacune d'elles doit conduire à une définition du béton qui les respecte toutes.

(p. 23)

Pour certains ouvrages en béton, des exigences complémentaires doivent être imposées. Elles concernent soit le béton frais, soit le béton durci.

(p. 24)

Exemple d'une centrale à béton. Plusieurs variantes sont possibles. Toutefois, les étapes de production suivantes se rencontrent dans chaque centrale: stockage et dosage des granulats (1/2) et des autres composants (ciment, eau, adjuvants) (3), malaxage, chargement des camions-mixers (4). L'équipement pour le recyclage du béton résiduel (5) et pour l'entretien du matériel (6) doit également être disponible.

(NB: Le laboratoire n'est pas repris sur la figure. Il est cependant indispensable pour le contrôle de la qualité : résistance à la compression, absorption d'eau...)

(p. 25)

Le gravier, le concassé et le sable sont amenés par bateau ou camion. Dans la configuration représentée ici, une courroie transporteuse est aménagée sous les stocks. Dans d'autres centrales, les différents types de granulats sont entreposés en forme d'étoile autour de la centrale, et introduits dans l'unité de dosage au moyen d'une 'dragline'.

(p. 26)

Ici, le dosage – le plus souvent en poids, parfois en volume – du gravier et du sable s'effectue à partir de silos. Les matériaux tombent sur une bande transporteuse équipée d'un dispositif de pesage. La connaissance précise du taux d'humidité des granulats est primordiale. Les installations automatiques doivent également être contrôlées régulièrement.

(p. 27)

Les silos de ciment sont remplis au moyen d'un dispositif pneumatique. La trémie peseuse est alimentée par une vis d'Archimède. Les adjuvants sont le plus souvent stockés en forme liquide dans des fûts.

(p. 28)

En fonction du type de malaxeur, la capacité utile se situe entre 50 et 75 % du volume de la cuve. L'ordre d'introduction est indiqué par le fabricant du malaxeur et doit être strictement respecté. La durée de malaxage idéale est le temps nécessaire à l'obtention d'un mélange homogène de béton frais. Cette durée dépend de plusieurs facteurs, e.a. le type de béton et ses composants. La propreté de la cuve et le degré d'usure des palettes jouent également un rôle.

(p. 29)

Afin de pouvoir réutiliser des matières premières provenant de bétons résiduels, celles-ci doivent être soigneusement identifiées, triées et stockées. Les résidus d'adjuvants contenus dans l'eau de gâchage recyclée peuvent provoquer des effets secondaires indésirables.

(p. 31)

Unité de production de hourdis précontraints : de la préparation du coffrage (1) jusqu'au stockage des produits finis (5). L'usine dispose de sa propre centrale à béton (2). Les hourdis sont bétonnés en continu dans des coffrages métalliques, d'une longueur de 120 à 150 m (3). Ils ont sciés seulement après durcissement (4). Un cycle, du bétonnage jusqu'au décoffrage, dure généralement 24 heures. La fabrication de poutres et colonnes précontraintes s'effectue dans des coffrages plus courts (p. ex. 80 m). Contrairement aux hourdis, ces éléments sont coulés séparément : les abouts des colonnes et des poutres sont coffrés au moyen d'intercalaires pourvus de réservations par lesquelles passent les barres de précontrainte.

(p. 32)

Le coffrage est nettoyé à l'air comprimé. Une machine ajuste les armatures et enduit le fond du coffrage d'un produit de décoffrage. Les armatures sont tendues au moyen de vérins, puis bloquées. Ces vérins se trouvent dans un massif d'ancrage. L'armature de colonnes et de poutres comprend également des étriers. En plus, pour permettre la liaison avec d'autres éléments de structure sur chantier, des barres d'attente, des gaines, des plaques d'ancrage etc. sont incorporées. De même, des crochets de levage doivent être prévus pour le transport et le montage.

(p. 33)

Le béton utilisé est un béton normal avec une résistance à la compression relativement élevée, p. ex. au moins 55 N/mm². Grâce à son rapport E/C faible, le béton garde sa forme après mise en œuvre.

(p. 34)

Les bords du coffrage servent de rails sur lesquels la machine à bétonner avance. Le béton est mis en place par pression (extrusion).

Le fond du coffrage peut être chauffé de façon à accélérer le durcissement du béton.

Dans le cas des colonnes et des poutres, des vibrateurs sont montés sur les faces latérales du coffrage.

(p. 35)

Lorsque les essais de compression démontrent que le béton a atteint une résistance mécanique suffisante, les vérins sont desserrés. La tension est transférée au béton, qui est ainsi mis en précontrainte. Ensuite les éléments sont sciés aux longueurs souhaitées.

(p. 36)

Les éléments sont soulevés du coffrage et stockés jusqu'au moment où ils seront transportés sur chantier.

(p. 37)

Une usine de pavés comprend une centrale à béton (1), une installation de bétonnage (2), un espace abrité dans lequel les produits frais peuvent durcir (3) et éventuellement diverses machines de finition (4).

Après mise sous emballage et palettisation, les produits peuvent être stockés en plein air (5).

(p. 38)

Le béton à consistance terre humide présente un rapport E/C très faible : il est inférieur à 0,45 et descend dans certains cas même jusqu'à 0,28. Un tel béton demande beaucoup d'énergie de compactage.

Certains produits sont constitués de deux types de béton : le noyau est fait d'un béton ordinaire, la couche de surface contient par exemple des granulats spéciaux, des pigments, un autre type de ciment etc.

(p. 39)

Le processus de fabrication est entièrement automatisé : le moule est positionné sur un plateau puis rempli; le béton est dérasé du moule. Le compactage se fait par vibration et compression. Les éléments sont décoffrés immédiatement.

(p. 40)

Les plateaux avec les produits décoffrés sont rangés dans des étagères. En raison de leur faible teneur en eau, toute dessiccation des produits frais doit être soigneusement évitée à ce stade. Cela empêcherait l'hydratation du ciment et entraînerait une perte de qualité : surface sableuse, rupture des coins, matériau très poreux...

(NB : Il est déconseillé d'arroser les produits avec de l'eau, car cela risque de provoquer des exsudations de chaux.)

(p. 41)

Le sablage, le bouchardage, le passage au tambour sont des techniques de finition ayant pour but de conférer aux pavés un aspect artisanal, en les vieillissant artificiellement.

(p. 42)

Le béton jeune est sensible aux exsudations de chaux. La surface du béton ne doit pas être mouillée par la pluie ou la neige. Attention également en cas d'utilisation de bâches en plastique : éviter tout mouillage par condensation !

(p. 43)

Les bétons décoratifs se caractérisent par des formes, des textures et des couleurs spéciales. Cette figure donne un aperçu des étapes de production type : fabrication des coffrages et des armatures (1), confection du béton frais (2), mise en œuvre du béton (3), finition de la surface du béton (4/5), stockage en attendant le transport et le montage (6).

(p. 44)

Parfois les éléments en béton décoratif demandent des coffrages et des armatures de formes complexes, par ex. pour des escaliers, des panneaux de façade, des corniches... Les parties du coffrage doivent être assemblées dans un ordre tel qu'elles peuvent être démontées facilement lors du décoffrage, et sans que les moulures, les larmiers etc. ne se cassent.

(p. 45)

En accord avec le concepteur/maître de l'ouvrage, des compositions de béton spéciales peuvent être mises au point. Les stocks de matières premières seront adaptés à la taille des séries de production. L'utilisation de matières premières provenant de différentes livraisons peut donner lieu à des différences de teintes indésirables sur la surface des produits finis.

(p. 46)

Le bétonnage doit être soigneusement préparé. Par exemple, un panneau sandwich comprend une feuille extérieure, une couche d'isolation et une feuille intérieure. Les deux feuilles contiennent des armatures et elles sont ancrées l'une à l'autre. La feuille intérieure est en outre équipée de barres d'attente, de crochets de levage, et éventuellement de gaines et de réservations pour conduites, câbles, prises... La feuille extérieure est généralement constituée d'un noyau et d'une couche de surface faite d'un autre type de béton (voire un autre matériau, p. ex. pierre naturelle, brique...)

(p. 47)

Dans certains cas, le polissage est effectué dans une installation commandée par ordinateur, par exemple pour réaliser des surfaces planes ou cylindriques. Des formes plus complexes sont polies manuellement.

(p. 48)

Pour réaliser une surface en béton lavé, l'intérieur du coffrage est enduit d'un produit retardateur avant la mise en œuvre du béton. Après décoffrage, la couche superficielle non hydratée est enlevée au jet d'eau, de façon à révéler les gros granulats.

En appliquant une pâte acide, la peau de ciment se dissout partiellement. Ensuite l'élément doit être rincé abondamment. La surface ainsi obtenue est mate.

Un aspect également mat, mais plus rugueux, est obtenu par sablage.

(p. 49)

Lors du stockage, du transport et du montage, il importe de prendre toutes les mesures nécessaires pour empêcher la dégradation et l'encrassement des éléments. Le béton jeune est sensible aux exsudations de chaux. Pour cette raison il ne doit pas être mouillé par la pluie, la neige, l'eau de condensation...

Les éléments de façade sont généralement traités avec un produit protecteur (hydrofuge, anti-graffiti ...).

(p. 50)

En fonction du type de tuyau (dimensions, domaine d'application...), plusieurs procédés sont possibles.

La figure montre les étapes de la production de tuyaux armés, fabriqués verticalement : assemblage des cages d'armature en spirale (1), confection du béton frais (2), bétonnage (3), entreposage temporaire et finition (4), contrôle de la qualité (5), stockage (6).

Pour chaque type de tuyau, il existe en outre des pièces accessoires, telles des manchons, des raccords,...

(p. 51)

Les tuyaux à faible diamètre et qui ne sont pas exposés à des sollicitations mécaniques importantes, sont également fabriqués en béton non armé. Pour certaines applications, il existe aussi des tuyaux en béton armé de fibres d'acier.

(p. 52)

Pour chaque type de tuyau une composition de béton spécifique est mise au point. Le béton utilisé pour des tuyaux qui seront exposés à des agents agressifs, doit répondre à des critères sévères en matière de granulométrie, type de ciment et teneur en ciment. Pour obtenir un béton compact, le rapport E/C doit être le plus bas possible.

(p. 53)

Exemple de dispositif pour fabriquer des tuyaux. D'abord l'anneau inférieur – avec joint en caoutchouc – et l'armature (non repris sur le dessin) sont mis en place (a). Puis le moule extérieur est abaissé (b). Pendant que le béton est déversé, le moule intérieur monte en tournant (c). Il est équipé de vibrateurs. Enfin le moule extérieur est relevé (d). Les bavures éventuelles sont éliminées. La forme exacte de l'about mâle est assurée au moyen d'un anneau protecteur en acier.

(p. 54)

Les tuyaux fraîchement décoffrés sont rangés verticalement dans un espace abrité. Lors de la manipulation, toute dégradation des abouts doit être évitée. Afin d'éviter l'évaporation de l'eau de gâchage, il peut être utile de pulvériser un produit de cure sur les tuyaux.

Après 24 heures, c.-à-d. lorsque le béton a suffisamment durci, les anneaux peuvent être enlevés. Avant d'être réutilisés, ils doivent être nettoyés, et leurs formes et dimensions contrôlées.

(p. 55)

Les tuyaux sont soumis à un essai d'étanchéité sous vide.

(p. 56)

L'entassement de tuyaux trop jeunes en couches peut provoquer des fissures.

(p. 57)

'De petites quantités', c.-à-d. moins d'un m³.

La pierraille et le sable sont stockés sur une surface propre et dure, et couverts d'une bâche.

Les sacs de ciment sont conservés dans un endroit sec.

(p. 58)

Lorsque le ciment est introduit en premier dans la bétonnière, des grumeaux se formeront.

(p. 59)

Il est pratiquement impossible de doser correctement les adjuvants sur chantier et pour une petite quantité de béton. Dans tous les cas, l'utilisation d'adjuvants 'alternatifs', tels des détergents, est à proscrire !