

Chapitre 5 : Béton hydraulique

5.1 Indications générales

Le Béton est un matériau composite fabriqué à partir de granulats (sable, graves) agglomérés par un liant. Le liant peut être « hydraulique » (car il fait prise par hydratation ; ce liant est couramment appelé ciment) ; on obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

- Le coulis : mélange très fluide de ciment et d'eau.
- Mortier : liant hydraulique + sables.

Il est possible de modifier (accélérer ou, au contraire, retarder) la vitesse de prise en incorporant au béton frais des adjuvants (additifs).

L'eau a un double rôle: d'hydratation et facilitateur de la mise en œuvre (ouvrabilité). En l'absence d'adjuvant plastifiant, la quantité d'eau est déterminée par la condition de mise en œuvre.

La confection du béton, doit concilier entre la maniabilité et la résistance mécanique du béton. Ces deux paramètres dont les objectifs sont opposés, seront corrigés en utilisant les matériaux conformes pour obtenir la bonne formulation du béton, on signale que :

- L'eau en excès permet une bonne maniabilité du béton mais une mauvaise résistance.
- Les granulats roulés donnent une bonne maniabilité au béton mais une mauvaise résistance.
- Les granulats concassés permettent une mauvaise maniabilité et bonne résistance du béton.

Toute fois, d'autres facteurs peuvent engendrer des problèmes pour le béton, tels que :

- Corrosion
- Attaque par les sulfates.
- Fissures (par retrait, fluage,...).
- Le Béton de ciment présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction (1/10), et donc aussi à la flexion.

5.2 Consistance du béton

La consistance d'un béton est un facteur important. Elle conditionne la facilité de mise en place du béton dans le coffrage et influe sur le dosage en ciment et en eau dans le béton. Elle a donc indirectement une conséquence sur le prix du béton. Plus l'ouvrabilité demandée est grande plus le béton contient d'eau et de ciment, plus son coût est élevé. Le choix de la consistance est donc un équilibre entre le coût du béton et l'ouvrabilité requise pour la mise en œuvre du béton.

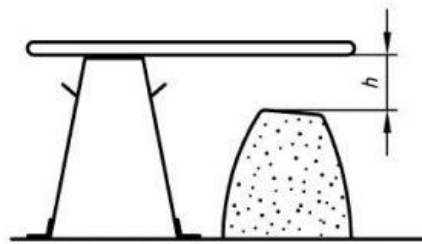
Le béton étant un matériau moulable, il doit présenter, à l'état frais, des caractéristiques lui permettant de bien remplir les coffrages et de bien enrober les armatures. Cette aptitude est appelée ouvrabilité. Elle est qualifiée par la mesure de la consistance. Dans la pratique, un

béton est considéré comme ayant une ouvrabilité correcte, s'il présente une consistance adéquate pour les conditions de mise en œuvre considérées.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité du béton est la consistance. La mesure de la consistance peut être effectuée sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams permet de mesurer la consistance du béton frais par l'essai d'affaissement. L'essai d'affaissement est sensible aux modifications de la consistance du béton correspondant à des affaissements compris entre 10 mm et 210 mm. En dehors de ces limites, la mesure de l'affaissement peut être inadaptée et il convient d'envisager d'autres méthodes de détermination de la consistance. Si l'affaissement évolue au-delà de la minute suivant l'enlèvement du cône, l'essai d'affaissement n'est pas adapté à la mesure de la consistance. Pour la mise en œuvre de cet essai, il faut suivre les étapes suivantes :

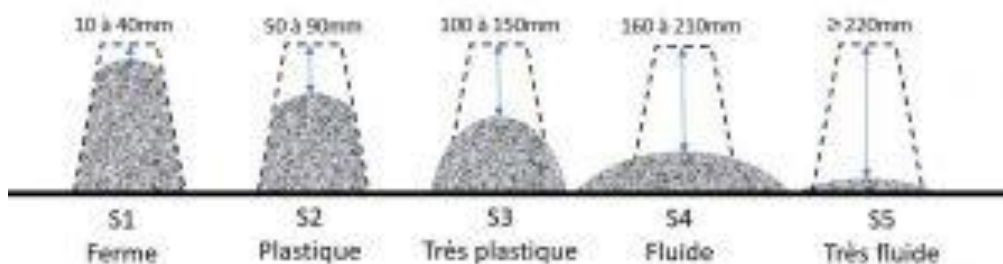
- remplir de béton un moule tronconique ($D = 20\text{cm}$, $d = 10\text{cm}$, $h = 30\text{cm}$) ;
- le remplissage s'effectue en trois couches compactées avec une tige d'acier de 16mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche ;
- on soulève ensuite le moule avec précaution ;
- on mesure l'affaissement du béton.



Les différentes classes d'affaissement :

Selon la valeur obtenue, le béton est classé en fonction de sa consistance par rapport aux 5 classes de S1 à S5 indiquées dans le tableau suivant valeurs étant :

| Classe | Affaissement en mm | Désignation de la consistance |
|--------|--------------------|-------------------------------|
| S1 | 10 à 40 | Ferme |
| S2 | 50 à 90 | Plastique |
| S3 | 100 à 150 | Très plastique |
| S4 | 160 à 210 | Fluide |
| S5 | ≥ 220 | Très fluide |



5.3 Dosages et compositions

5.3.1 Composition du béton

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il peut varier en fonction de ses utilisations.

a. Ciment

Le ciment joue le rôle de liant du béton hydraulique. Le ciment est composé d'un mélange en poudre de chaux et de calcaire argileux qui durcit avec l'eau. Pour faire du béton ou du mortier, on utilise du ciment gris ordinaire dit de Portland.

b. Sable ou granulat

On utilise généralement du sable de rivière ou de carrière débarrassé des impuretés, jamais de sable marin ou de sable de remblai. Ces derniers contiennent des éléments néfastes pour la qualité du béton et du mortier. Les dosages sont donnés la plupart du temps en volume de sable sec.

c. Eau

Tout comme les autres composants du mélange, l'eau doit être propre. Le dosage doit faire preuve d'une attention particulière : trop d'eau dans le béton entraîne la naissance de fissures et une perte de résistance au moment du séchage.

L'association ciment-eau génère des réactions extrêmement complexes. Les silicates et aluminates se développent pendant la phase d'hydratation. Ils forment alors un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise". Au cours de la phase de durcissement, qui peut durer plusieurs mois, la multiplication des microcristaux augmentent les résistances mécaniques : le béton se transforme alors en une véritable roche composite.

d. Gravier

Le gravier est composé de particules rocheuses lisses quand elles sont issues d'une rivière (c'est le gravier le plus recherché) ou concassées quand elles proviennent d'une carrière. Il faut impérativement que le gravier soit débarrassé de toutes les impuretés. Il existe différents calibres de gravier. Les plus gros calibres sont utilisés en général pour les fondations et le gros œuvre. La résistance du béton sera d'autant plus grande si on mélange différents calibres de graviers.

e. Adjuvants

Les adjuvants (additifs) sont incorporés au béton en faible quantité (moins de 10 kg/m³). Les super plastifiants ou fluidifiants ont des propriétés similaires à celles de réducteurs d'eau, mais avec une efficacité beaucoup plus importante. Ils permettent des fluidités extrêmes, utiles pour produire des bétons auto-plaçants, ou auto-nivelants (Chape liquide...).

D'autres adjuvants permettent de modifier la prise et le durcissement comme les accélérateurs de prise qui permettent de décoffrer rapidement, ou au contraire des retardateurs, utilisés pour maintenir l'ouvrabilité du béton

5.3.2 Dosage du béton

Pour réussir la confection d'un béton, il faut de raisonner en volume plutôt qu'en kilogramme et litre.

- **Pour la confection du béton pour divers usage** : On utilise la règle du 1-2-3 : 1 volume de ciment + 2 volumes de sable + 3 volumes de gravier + ½ volume d'eau.
- **Dosage pour réaliser du mortier** : 1 volume de ciment + 3 ou 4 volumes de sable + ½ volume d'eau. Un béton ou un mortier réussi ressemble à une pâte collante qui accroche à son support.

Le dosage par mètre cube de béton en œuvre en fonction des utilisations sont les suivants :

| Type de béton | Dosage du liant (kg) | Classe de liant |
|-----------------------------|----------------------|-----------------|
| Béton maigre ou de propreté | 150 | 250 |
| Béton pour fondation | 250 | 250 |
| Béton non armé | 300 | 325 |
| Béton coulé dans l'eau | 350 | 325 |
| Béton pour béton armé | 350 | 325 |

5.4 Résistance du béton

Un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours (f_{c28}). Cette résistance varie en fonction de l'âge du béton en jours.

La mesure de sa résistance en compression est assurée à l'aide des éprouvettes. Cette résistance diminue si on augmente la quantité d'eau dans le béton et augmente si on augmente la quantité de ciment. On soumet ces éprouvettes (en général 28 jours après avoir confectionné les éprouvettes) à une force d'écrasement et on mesure l'effort nécessaire pour casser l'éprouvette. La résistance à la compression des bétons courants est comprise entre 20 et 50 MPa (au-delà de cette résistance on parle de bétons à hautes performances).

La résistance à la traction du béton à j jours est exprimée en MPa notée par (f_{tj}). Conventionnellement il est calculée par :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad \text{si} \quad f_{c28} < 60 \text{ MPa}$$

$$\text{Et} \quad f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3} \quad \text{si} \quad 60 < f_{c28} < 80 \text{ MPa}$$

5.5 Choix des matériaux de composition

5.5.1 Eau de gâchage

L'eau entrant dans la composition ne doit pas contenir d'éléments nuisibles et d'impuretés en quantités ou provoquer la corrosion des armatures.

- L'eau potable convient à tous types de bétons.

- L'eau de ruissellement, les eaux pompées de la nappe phréatique, les eaux de rejets industrielles doit subir un essai convenance.
- L'eau de Mer et eaux saumâtres peuvent être utilisées pour du béton non armé uniquement. Les eaux usées et eaux de vannes ne conviennent pas.

5.5.2 Granulats

Un granulats est constitué par l'ensemble de grains minéraux appelés fines, sable, gravillons ou cailloux suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 80 mm.

| Diamètre | fine | sable | gravillons | cailloux | graves |
|----------|--------|------------|------------|----------|----------|
| (mm) | < 0.08 | 0.08 à 6.3 | ≤ 31.5 | ≤ 80 | 6.3 à 80 |

Pour le choix des granulats, on doit se baser sur les critères suivants :

Critère 1 : Adéquation granulats/ béton

Certaines caractéristiques des granulats peuvent avoir une influence sur la qualité du béton, telles que :

- Nature minéralogique : présence d'argile (problème de gonflement)
- Présence de matière organique : Problème de prise et de durcissement
- Teneur élevée en sulfates et chlorures : Problème de fissuration, corrosion des armatures.

Critère 2 : Aptitude à l'emploi selon la roche d'origine.

Les roches d'origine magmatique, métamorphique et sédimentaire (calcaire, dolomie), peuvent être utilisées dans la confection du béton.

Critère 3 : choix des granulats la nature du béton souhaité.

5.5.3 Ciment

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques, car, ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et cette hydratation transforme la pâte liante à consistance plus ou moins fluide, qui se transforme en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

5.6 Fabrication des bétons

5.6.1 Un matériau homogène : pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours des phases de fabrication et de transport, de l'homogénéité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohesion. Parmi les facteurs influant sur l'homogénéité du mélange béton, on peut notamment souligner :

- la régularité de chaque constituant : les données retenues pour fixer les paramètres de dosage ou de mélange ne doivent pas être remises en cause par d'éventuelles variations de ceux-ci ;

- la détermination d'une composition de béton tenant compte de sa destination et des constituants utilisés : type et classe de ciment, nature et granularité des granulats, adjuvants ;
- la teneur en eau ;
- le type de matériel utilisé pour le malaxage ;
- le temps de malaxage ;
- les conditions et temps de transport du béton entre sa fabrication et sa mise en œuvre.

5.6.2 La fabrication : les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de BPE (Centrale de Béton Prêt à l'Emploi), dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers

- a. Le malaxage des constituants** : Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant. Les matériels de malaxage sont :
 - Les bétonnières
 - Les malaxeurs
- b. Les paramètres du malaxage** : Une fois déterminé l'appareil adapté au béton à réaliser, le malaxage, pour être efficace, doit prendre en compte certains paramètres :
 - l'ordre d'introduction des composants ;
 - la vitesse de rotation de la cuve ;
 - le temps de malaxage.

La vitesse de rotation des appareils est de l'ordre de 20 à 30 tours/mn, et diminue avec le diamètre de la cuve. Elle ne dépasse pas 20 tours/mn pour les bétonnières.

Le temps de malaxage est de l'ordre de 45 secondes. En revanche, les bétons très fermes ou riches en éléments fins peuvent nécessiter des durées de malaxage plus longues : 1 à 2 minutes.

5.7 Le transport du béton

a. Le transport du béton par benne, goulotte, tapis

Sur le chantier même, le matériel le plus utilisé pour le transport du béton est la benne à béton, dont la forme et les dimensions sont très variables. Elle est remplie par le haut, et vidée par le bas, grâce à une ouverture mécanique ou pneumatique d'une trappe. Le transport de béton de la centrale à béton vers l'ouvrage s'effectue par un camion toupie (Goulotte).

b. Le transport du béton par pompage :

Le pompage du béton est une technique qui permet une importante productivité, la limitation du temps d'attente avant la mise en place du béton, la possibilité d'assurer l'approvisionnement sur des sites à accès difficiles. Le camion-pompe équipé de flèches

allant jusqu'à 60 m, peut envoyer le béton directement de la toupie au lieu de coulage. L'évolution rapide des bétons pompés permet ainsi d'atteindre des longueurs de transport de 300 à 400 m, jusqu'à 100 m et plus en hauteur avec des bétons particulièrement adaptés.

5.8 Les adjuvants

Produit chimique incorporé à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés. L'incorporation se fait soit avant, pendant le mélange, ou bien au cours d'une opération supplémentaire de malaxage.

Les adjuvants utilisés en faible proportion (moins de 5 % du poids du ciment) améliorent les propriétés du béton (béton frais ou béton durci). Ils permettent de formuler des bétons "sur mesure" aux performances adaptées à chaque ouvrage. Certains, par exemple, rendent le béton liquide lors de sa mise en œuvre, sans pour autant réduire ses résistances mécaniques finales. Les adjuvants sont aujourd'hui pratiquement toujours utilisés pour la formulation des bétons. Ils sont classés selon leur fonction principale (retardateur de prise, entraîneur d'air, hydrofuge de masse, plastifiant, super plastifiant, plastifiant réducteur d'eau, accélérateur de prise).

5.8.1 Les adjuvants modifiant la maniabilité du béton

- **Les plastifiants** A teneur en eau égale, ils augmentent la maniabilité du béton,
- **Les plastifiants réducteurs d'eau** A même maniabilité, ils augmentent les résistances mécaniques. Ils facilitent la mise en place du béton dans les pièces fortement armées.
- **Les super-plastifiants** Ils provoquent un fort accroissement de la maniabilité du mélange

5.8.2 Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

- **Les accélérateurs de prise et de durcissement** Ils diminuent les temps de prise ou de durcissement du ciment. Ils facilitent le bétonnage par temps froid
- **Les retardateurs de prise** Ils augmentent le temps de prise du ciment. Ils sont utiles par temps chaud

5.8.3 Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

- **Les entraîneurs d'air** Ils entraînent la formation de micro bulles d'air uniformément réparties et améliorent la tenue au gel des bétons courants.
- **Les hydrofuges de masse** Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers et augmentent leur durabilité.

5.8.4 Les produits de cure Ils protègent le béton frais de la dessiccation.

5.9 Essais et contrôle

5.9.1 Contrôle de la résistance mécanique

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au

dosage en ciment. Parmi les formules qui permettent de prévoir les résistances, celle de Féret est la plus connue.

$$R = k \left(\frac{C}{C + E + V} \right)$$

R = résistance du béton

k = coefficient dépendant de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre

C = dosage en ciment

E = dosage en eau

V = volume d'air subsistant

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance. Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

- Lors des essais destructifs, la résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes généralement cylindriques ; la plus courante est l'éprouvette de diamètre 16 cm, hauteur 32 cm ; confectionnées avec le béton destiné à l'ouvrage à contrôler.
- Les essais non destructifs peuvent utiliser le scléromètre, appareil basé sur le rebondissement d'une bille d'acier sur la surface à tester, ou des instruments de mesure de la vitesse du son au travers du béton (4 000 m/s pour un béton courant).

5.9.2 Mesure de la consistance du béton « slump test »

a. But de l'essai

Le slump-test ou le cône d'Abrams permet d'évaluer la consistance d'un béton courant, c'est-à-dire ni trop sec ni trop fluide. Cette méthode convient bien pour le contrôle du béton sur chantier lors de la réception. La consistance est caractérisée par l'affaissement, mesuré en mm après démoulage, d'un cône de en béton de forme normalisée.

b. Mode opératoire :

1. Mouiller l'intérieur du moule.
2. Placer le moule avec la rehausse sur un support rigide et horizontal, mais non absorbant.
3. A l'aide d'une truelle remplir le moule de béton frais, en trois couches d'à peu près même hauteur, éviter le déplacement du moule en pesant sur les pattes de calage.
4. Compacter chaque couche par 25 coups de barre.
5. Retirer la rehausse, araser le dessus du moule et nettoyer le support autour du moule.
6. Retirer le moule verticalement avec précaution.
7. Mesurer l'affaissement du cône par rapport à la hauteur initiale (moule).

| Consistance | plastique | molle | fluide |
|-------------|-----------|--------|--------|
| Slump en cm | 1 à 7 | 8 à 15 | ≥ 16 |